



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PERHITUNGAN *CRITICAL CLEARING TIME* (CCT)
PADA KONDISI UNBALANCED MENGGUNAKAN
METODE MODIFIKASI *LOSS OF SYNCHRONIZATION*
PADA SISTEM MULTIMESIN**

Galuh Santiko Aji
NRP 2211100125

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**CRITICAL CLEARING TIME (CCT) COMPUTATION FOR
UNBALANCED CONDITION USING MODIFIED LOSS OF
SYNCHRONIZATION METHOD IN MULTI MACHINE
SYSTEM**

Galuh Santiko Aji
NRP 2211100125

Advisor
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**PERHITUNGAN *CRITICAL CLEARING TIME* (CCT) PADA
KONDISI *UNBALANCED* MENGGUNAKAN METODE
MODIFIKASI *LOSS OF SYNCHRONIZATION* PADA SISTEM
MULTIMESIN**

TUGAS AKHIR

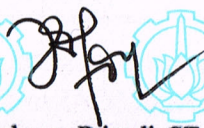
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada


Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

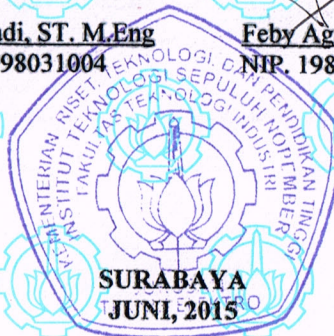
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng
NIP. 197309271998031004


Feby Agung Pamuji, ST.,MT.
NIP. 198702062012121002



PERHITUNGAN *CRITICAL CLEARING TIME* (CCT) PADA KONDISI UNBALANCED MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI *LOSS OF SYNCHRONIZATION* PADA SISTEM MULTIMESIN

Nama : Galuh Santiko Aji
Pembimbing I : Dr. Eng Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T.

ABSTRAK

Analisis mengenai kestabilan transien sistem tenaga listrik memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin keamanan dan keberlangsungan operasional suatu sistem tenaga listrik. Pada saat terjadi gangguan, Sistem akan mengalami beberapa fase kondisi, salah satu kondisi paling vital adalah kondisi transien. Pada kondisi *transient* terjadi gangguan yang lebih besar seperti hubung singkat. Sebagian besar gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik adalah jenis gangguan tidak seimbang. Dalam kondisi tersebut rele pengaman akan bekerja untuk membuka *circuit breakers* (CB). Pada umumnya CB akan bekerja dalam kurun waktu 200-300 ms. Akan tetapi hal ini tidak menjamin sebuah Sistem akan langsung kembali pada kondisi *steady state*. Hal ini disebabkan adanya waktu pemutus kritis / *Critical Clearing Time* (CCT) ketika kondisi transien. CCT merupakan perhitungan batas waktu pemutus kritis setelah terjadi gangguan. Apabila gangguan diputus sebelum CCT maka sistem dapat kembali stabil. Namun apabila gangguan diputus lebih dari CCT maka sistem tidak dapat kembali stabil. Oleh karena itu diperlukan perhitungan CCT yang akurat untuk kelangsungan operasi dari Sistem tenaga listrik. Dalam tugas akhir ini akan dihitung nilai CCT pada Sistem multimesin menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* dengan berbagai kondisi gangguan hubung singkat tidak setimbang.

Kata Kunci : Kestabilan Transien, Gangguan Tidak Seimbang, *Critical Clearing Time* (CCT).



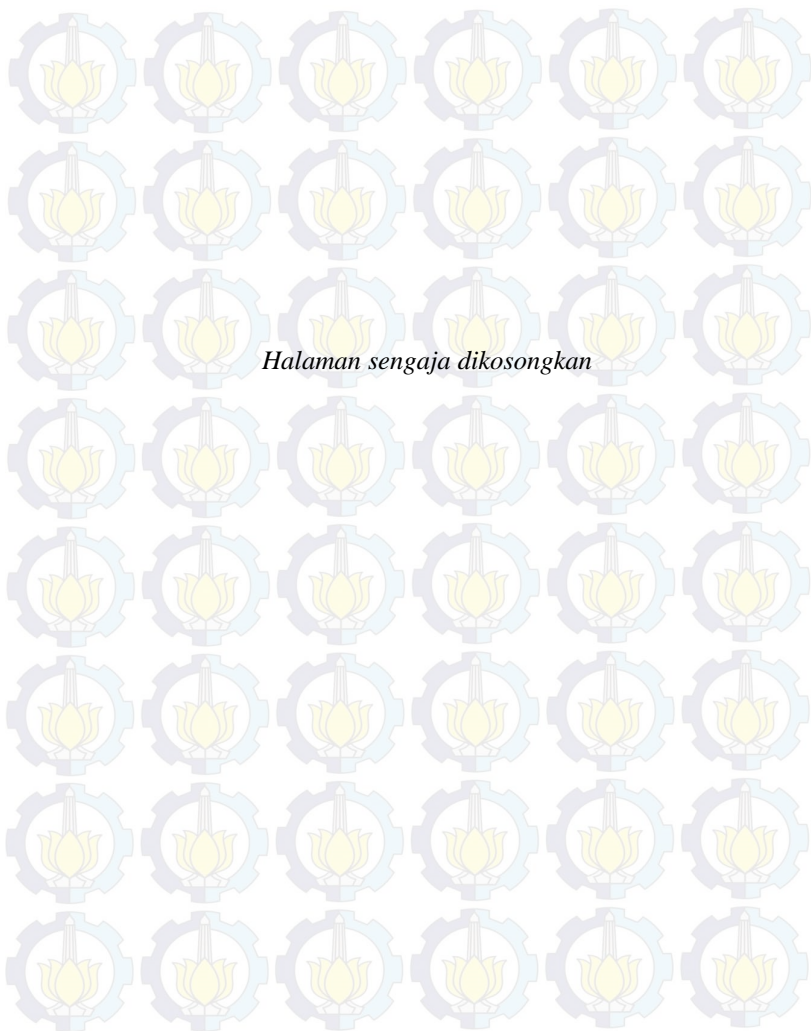
Critical Clearing Time (CCT) Computation for Unbalanced Condition Using Modified Loss of Synchronization Method in Multi Machine Sistem

Name : Galuh Santiko Aji
Advisor I : Dr. Eng Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Advisor II : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T.

ABSTRACT

Transient stability analysis is most important case to guarantee of safety and continuing operate of power Sistem. In the event of disturbances, Sistem will be get some conditions, the most one is transient condition. Transient make a great of disturbances like a short circuits. Most of disturbances in power Sistem is unbalanced faults. In the event of disturbance, protection relay will work to open the circuit breakers in about 200-300 ms. Unfortunately, It is does not guarantee the Sistem will be return to steady-state conditions. This is due to the existence of critical clearing time (CCT) on the electricity Sistem. CCT is the calculation of critical time for Sistem to clear disturbance after it is occurrence. The disturbance should be clearance before the CCT for the Sistem to stabilize. When disturbance was cleared before the CCT, the Sistem can be stabilized. But when disturbance was cleared more than CCT then the Sistem can't be stabilized. Because of that, is needed to accurate computation of CCT to continuing operate of power Sistem. At this final project CCT will be calculated in multi machine Sistem using modification loss of synchronization method for unbalanced disturbances conditions.

Keywords: Transient Stability, Unbalanced Disturbances, *Critical Clearing Time* (CCT).



KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Allah SWT, berkat limpahan rahmat, hidayah dan inayah-Nya, alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul : **“Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) pada kondisi *unbalanced* menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* pada Sistem multi mesin”**. Penyusunan tugas akhir ini bertujuan sebagai pemenuhan salah satu syarat kelulusan program sarjana bidang studi Teknik Sistem Tenaga di jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Kendala dalam penyusunan tugas akhir tentu banyak dialami oleh penulis, tetapi dorongan semangat dan bantuan banyak diberikan oleh berbagai pihak dalam proses penyelesaian tugas akhir ini. Oleh karena itu atas selesainya tugas akhir ini tepat pada waktunya, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. ALLAH SWT, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta nikmat yang tiada terukur nilainya.
2. Seluruh keluarga besar yang berada di kota Jepara, terutama untuk kedua orang tua penulis, Musdalifah dan Slamet Hariyadi S.H yang selalu memberikan doa dan semangat kepada penulis. Kedua saudara penulis, Dida Tuhi Putranto, S.T. dan Dwitya Binar Adhityo S.E. yang selalu memberikan teladan yang baik sehingga mampu memotivasi penulis. Dan semua keluarga besar penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
3. Bapak. Dr. Eng Ardyono Priyadi, S.T. dan Bapak Feby Agung Pamuji, S.T.,M.T. yang telah banyak memberikan bantuan, arahan, ilmu dan juga motivasi kepada penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir.
4. Seluruh keluarga mahasiswa Elektro ITS, khususnya untuk sahabat penulis Alfa Kusnal, Moh.Aziz, S.Andri, Agung Adi, Feisal Hakim,S.T., Yoga Dewangga dan seluruh keluarga E-51 atas semangat, hiburan dan motivasi yang telah diberikan.
5. Nur Kamaarum dan seluruh keluarga atas dukungan dan doa yang diberikan kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir

6. Keluarga Besar Primagama Mulyosari yang telah memberikan sedikit pengalaman dan dukungan kepada penulis.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Terimakasih atas dukungan, semangat, doa, bantuan, motivasi yang telah diberikan hingga pada akhirnya penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga tugas akhir yang telah disusun oleh penulis mampu memberikan banyak manfaat untuk perkembangan penelitian dan teknologi khususnya dalam bidang Teknik Sistem Tenaga. Akhir kata penulis memohon maaf apabila selama masa studi terdapat banyak salah dan dalam tugas akhir ini masih terdapat ketidak sempurnaan. Oleh karena itu kritik dan saran sangat dibutuhkan oleh penulis guna perkembangan menuju arah yang lebih baik.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metodologi.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
1.6 Relevansi.....	6
BAB II KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK DAN GANGGUAN <i>UNBALANCED</i>	
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	8
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor.....	9
2.2.2 Kestabilan Frekuensi	11
2.2.3 Kestabilan Tegangan	12
2.3 Persamaan Ayunan.....	16
2.4 <i>Critical Trajectory</i>	17
2.5 <i>Damper Winding</i>	18
2.6 Pengertian Gangguan <i>Unbalanced</i>	20
2.7 Gangguan <i>Unbalanced</i> Pada Sistem Tenaga.....	20
2.7.1 Gangguan Satu Fasa Ke Tanah	20
2.7.2 Gangguan Antar Fasa.....	21
2.7.3 Gangguan Dua Fasa Ke Tanah	22

BAB III PEMODELAN SISTEM

3.1	<i>Power Flow</i>	23
3.2	Reduksi Matriks.....	27
3.3	Pemodelan Sistem.....	29
3.4	Pendefinisian Masalah.....	31
3.4.1	Runge Kutta Orde 4.....	32
3.4.2	Metode Modifikasi Persamaan Trapezoidal	32
3.4.3	<i>Boundary Condition</i>	34
3.4.4	<i>Least Square Minimization</i>	34
3.4.5	Metode Newton Raphson.....	35
3.4.6	Matriks Jacobian.....	36
3.5	Kondisi Kritis Hilangnya Sinkronisasi.....	37
3.6	Perumusan Minimalisasi	38
3.7	Perhitungan <i>Critical Clearing Time</i>	39

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Penentuan Parameter Awal Perhitungan CCT (<i>Critical Clearing Time</i>).....	43
4.2	Perhitungan CCT (<i>Critical Clearing Time</i>) pada Sistem Anderson dan Fouad 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i>	55
4.2.1	Perhitungan CCT untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	55
4.2.1.1	Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	57
4.2.2	Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	62
4.2.2.1	Analisis Grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	63
4.2.3	Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa	68
4.2.3.1	Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa	69
4.2.4	Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	74
4.2.4.1	Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	75

4.3 Perhitungan CCT (<i>Critical Clearing Time</i>) pada Sistem Anderson dan Fouad 3 Generator 9 Bus Menggunakan <i>Damping</i>	80
4.3.1 Perhitungan CCT untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	80
4.3.1.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	82
4.3.2 Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	87
4.3.2.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	88
4.3.3 Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa	93
4.3.3.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa	94
4.3.4 Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	99
4.3.4.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	100
4.4 Perhitungan CCT (<i>Critical Clearing Time</i>) pada Sistem IEEE 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i>	105
4.4.1 Perhitungan CCT untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	105
4.4.1.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	107
4.4.2 Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	112
4.4.2.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	113
4.4.3 Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa	118
4.4.3.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa	121
4.4.4 Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	124
4.4.4.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	125

4.5 Perhitungan CCT (<i>Critical Clearing Time</i>) pada Sistem IEEE 7 Generator 57 Bus Menggunakan <i>Damping</i>	130
4.5.1 Perhitungan CCT untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	130
4.5.1.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah.....	132
4.5.2 Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	137
4.5.2.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	138
4.5.3 Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa	143
4.5.3.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa	144
4.5.4 Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	149
4.5.4.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah.....	150
 BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	155
5.2 Saran.....	156
 DAFTAR PUSTAKA	157
RIWAYAT HIDUP PENULIS	159

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1	Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir 4
Gambar 2.1.	Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik 9
Gambar 2.2.	Grafik Lintasan Sudut Rotor Terhadap Waktu dalam Kondisi Transien Stabil dan Tidak Stabil 10
Gambar 2.3.	Arah Perputaran Torsi Mekanis dan Elektris Dari Rotor Generator..... 12
Gambar 2.4.	Lintasan Kritis Untuk Sistem <i>Single Machine</i> tanpa <i>Damping</i> 16
Gambar 2.5.	Penampang Generator Sinkron dengan <i>Damper</i> <i>Winding</i> 17
Gambar 2.6.	Konfigurasi Jaringan untuk Urutan Positif, Negatif Dan Urutan Nol..... 19
Gambar 2.7.	Diagram Sambungan Antar Saluran Fasa untuk Kondisi Gangguan Satu Fasa Ke Tanah..... 20
Gambar 2.8.	Diagram Sambungan Antar Saluran Fasa untuk Kondisi Gangguan Antar Fasa..... 21
Gambar 2.9.	Diagram Sambungan Antar Saluran Fasa untuk Kondisi Gangguan Antar Fasa..... 22
Gambar 3.1.	Skema Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik..... 23
Gambar 3.2.	Ilustrasi Metode Newton Raphson..... 25
Gambar 3.3.	Konfigurasi Matriks Jacobian Untuk Analisis Aliran Daya Metode Newton Raphson 26
Gambar 3.4.	(a) Kondisi Saluran Transmisi Awal (b) Saluran Transmisi Setelah Dilakukan Reduksi Kron 27
Gambar 3.5.	Pemodelan Generator Sinkron..... 30
Gambar 3.6.	Konsep Dasar Modifikasi Metode Trapezoidal..... 34
Gambar 3.7.	Konfigurasi Matriks Jacobian untuk perhitungan CCT metode modifikasi <i>loss of synchronization</i> 41
Gambar 4.1.	<i>Single Line Diagram</i> Sistem Anderson Dan Fouad 3 Generator 9 Bus. 44
Gambar 4.2.	<i>Single Line Diagram</i> Sistem IEEE 7 Generator 30 Bus. 45
Gambar 4.3.	Tahapan Dalam Perhitungan CCT Secara Langsung.. 53

Gambar 4.4.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah.....	58
Gambar 4.5.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah	60
Gambar 4.6.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah.....	60
Gambar 4.7.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah.	61
Gambar 4.8.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah.....	64
Gambar 4.9.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah	65
Gambar 4.10.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah.....	66

- Gambar 4.11.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah. 67
- Gambar 4.12.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa. 70
- Gambar 4.13.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa. 71
- Gambar 4.14.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa. 72
- Gambar 4.15.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa. 73
- Gambar 4.16.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Ke Tanah..... 76
- Gambar 4.17.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah. 77

Gambar 4.18.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.....	78
Gambar 4.19.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.	79
Gambar 4.20.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	83
Gambar 4.21.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	84
Gambar 4.22.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.....	85
Gambar 4.23.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	86
Gambar 4.24.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.....	89

- Gambar 4.25.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah..... 90
- Gambar 4.26.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah..... 91
- Gambar 4.27.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah. 92
- Gambar 4.28.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa. 95
- Gambar 4.29.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa..... 96
- Gambar 4.30.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa. 97
- Gambar 4.31.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa..... 98

Gambar 4.32.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.....	101
Gambar 4.33.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah	102
Gambar 4.34.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.....	103
Gambar 4.35.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan D Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.	104
Gambar 4.36.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	108
Gambar 4.37.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	109
Gambar 4.38.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	110

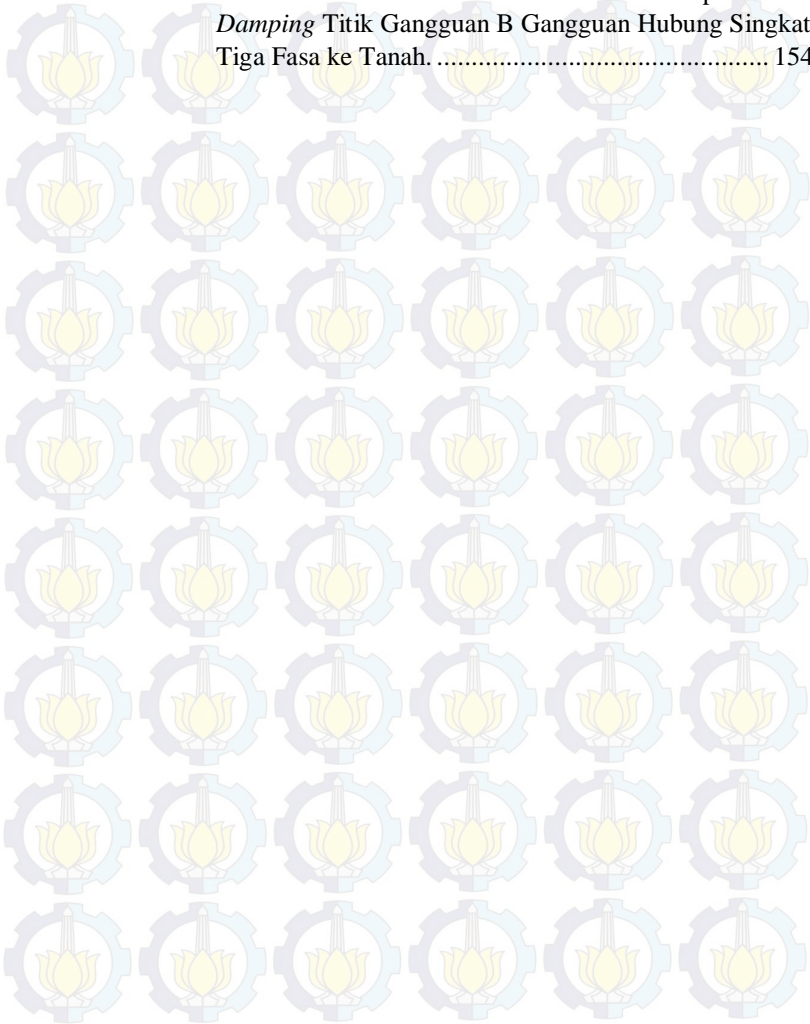
Gambar 4.39.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	111
Gambar 4.40.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.....	114
Gambar 4.41.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah.....	115
Gambar 4.42.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan AB Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	116
Gambar 4.43.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah.....	117
Gambar 4.44.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa	120
Gambar 4.45.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa.....	121

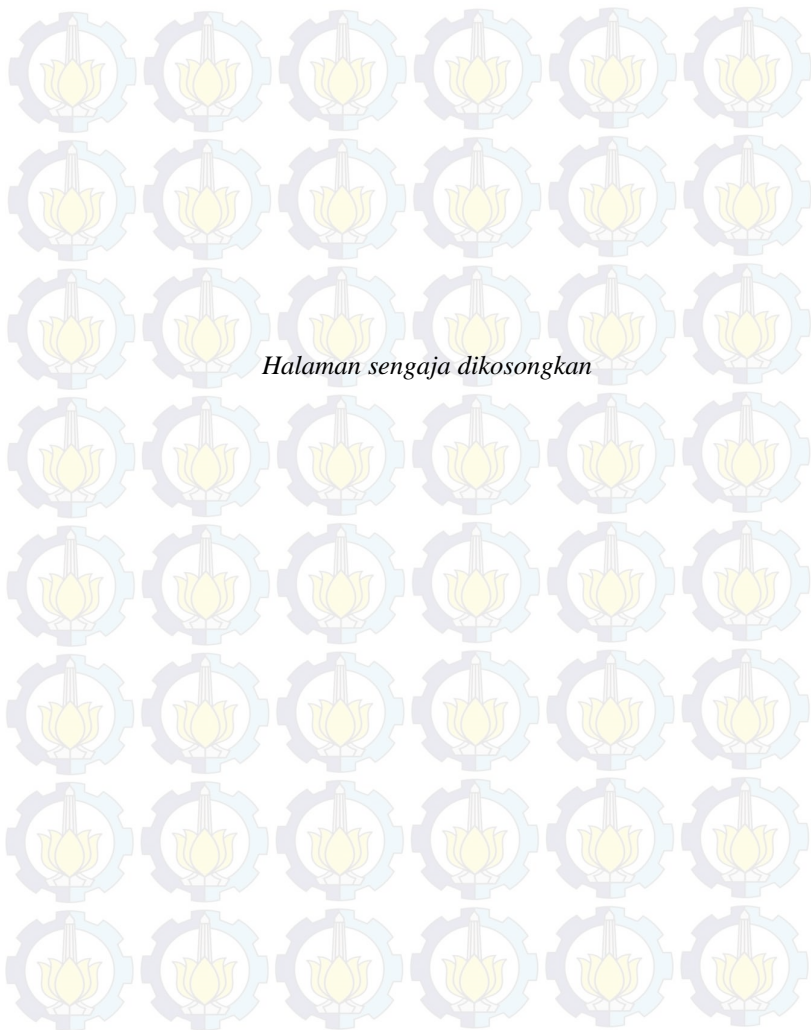
- Gambar 4.46.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa 122
- Gambar 4.47.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa..... 123
- Gambar 4.48.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah..... 126
- Gambar 4.49.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah. 127
- Gambar 4.50.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah..... 128
- Gambar 4.51.** (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah. 129
- Gambar 4.52.** Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan *Damping* Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah. 133

Gambar 4.53.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	134
Gambar 4.54.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	135
Gambar 4.55.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	136
Gambar 4.56.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.	139
Gambar 4.57.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.	140
Gambar 4.58.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.	141
Gambar 4.59.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.	142

Gambar 4.60.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa.	145
Gambar 4.61.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah.	146
Gambar 4.62.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa.	147
Gambar 4.63.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Antar Fasa.	148
Gambar 4.64.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Ke Tanah.	151
Gambar 4.65.	(a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Titik Gangguan A Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.	152
Gambar 4.66.	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan Rad/S Terhadap Sudut Rotor (δ) Dalam Satuan Rad Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.	153

Gambar 4.67. (a) Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Terhadap Waktu (b) Grafik Karakteristik Sudut Rotor Terhadap Waktu Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa *Damping* Titik Gangguan B Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah. 154



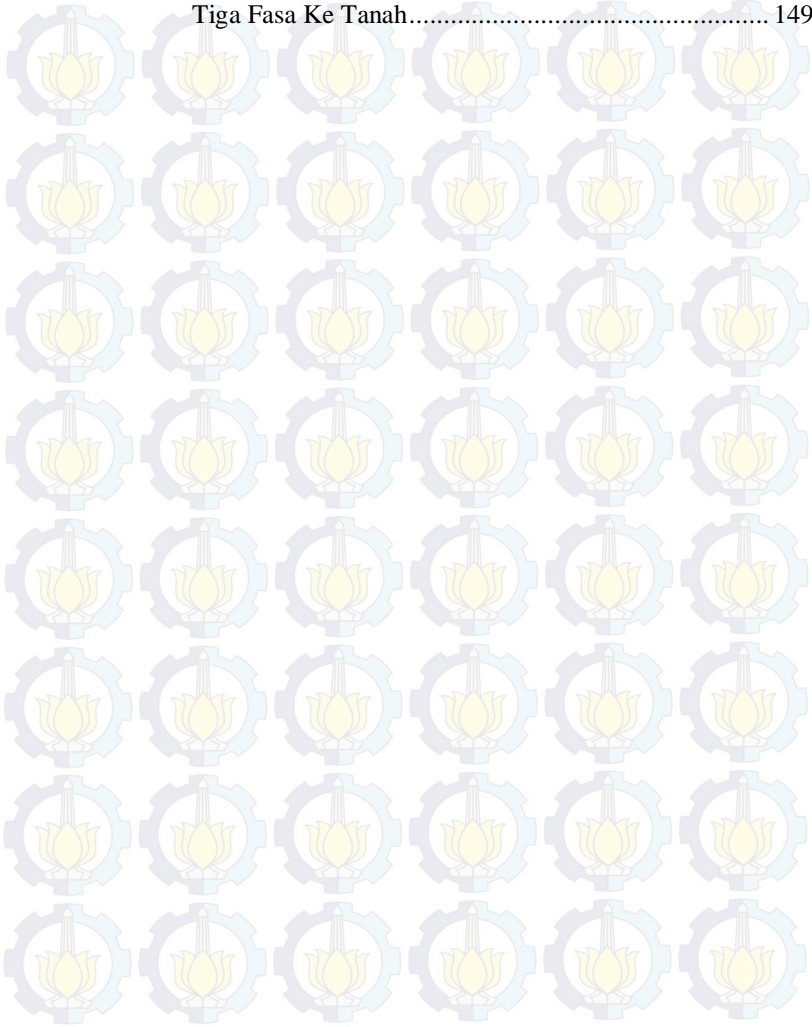


DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1.	Data Transmisi Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus 45
Tabel 4.2.	Data Tegangan, Daya yang dibangkitkan dan Beban tiap Bus untuk Sistem 3 Generator 9 Bus..... 46
Tabel 4.3.	Data Transmisi Untuk Sistem IEEE 7 Generator 57 Bus 47
Tabel 4.4.	Data Tegangan, Daya Yang Dibangkitkan Dan Beban Tiap Bus Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus 49
Tabel 4.5.	Nilai Sep (<i>Stable Equilibrium Point</i>) Untuk Maisng-Masing Generator Dalam Sistem 3 Generator 9 Bus 54
Tabel 4.6.	Nilai Sep (<i>Stable Equilibrium Point</i>) Untuk Maisng-Masing Generator Dalam Sistem 6 Generator 30 Bus ... 54
Tabel 4.7.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Satu Fasa Ke Tanah..... 56
Tabel 4.8.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Dua Fasa Ke Tanah..... 62
Tabel 4.9.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Antar Fasa 68
Tabel 4.10.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Tiga Fasa Ke Tanah..... 74
Tabel 4.11.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Gangguan Satu Fasa Ke Tanah 80
Tabel 4.12.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Gangguan Dua Fasa Ke Tanah 87

Tabel 4.13.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Gangguan Antar Fasa.....	93
Tabel 4.14.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 3 Generator 9 Bus Dengan <i>Damping</i> Gangguan Tiga Fasa Ke Tanah.....	99
Tabel 4.15.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Satu Fasa Ke Tanah.....	105
Tabel 4.16.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Dua Fasa Ke Tanah.....	112
Tabel 4.17.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Antar Fasa	118
Tabel 4.18.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Gangguan Tiga Fasa Ke Tanah.....	124
Tabel 4. 19.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Gangguan Satu Fasa Ke Tanah.....	130
Tabel 4.20.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Gangguan Dua Fasa Ke Tanah	137
Tabel 4.21.	Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan <i>Numerical Simulation Method</i> Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan <i>Damping</i> Gangguan Antar Fasa	143

Tabel 4.22. Perbandingan Nilai CCT Berdasarkan Metode Perhitungan Langsung Dengan *Numerical Simulation Method* Untuk Sistem 7 Generator 57 Bus Dengan *Damping* Gangguan Tiga Fasa Ke Tanah..... 149





BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam sebuah sistem tenaga listrik diperlukan kondisi stabil untuk segala operasi sistem, karena hal tersebut mampu menjamin keamanan dan kontinuitas penyaluran daya dalam sistem tenaga listrik. Kestabilan sistem tenaga adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk kembali ke kondisi operasi yang stabil setelah sistem tersebut mengalami gangguan dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja. Gangguan skala besar yang terjadi dalam sistem tenaga listrik biasa disebut gangguan *transient* seperti hubung singkat, pemindahan beban atau lepasnya generator secara tiba-tiba. Pada umumnya gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik adalah jenis gangguan tidak seimbang yang diantaranya adalah gangguan hubung singkat tidak simetri. Contoh gangguan hubung singkat tidak simetri antara lain adalah gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan gangguan antar fasa.

Dalam sistem tenaga listrik yang termasuk gangguan besar antara lain, trip pemangkit, hubung singkat dan motor *starting*. Apabila terjadi gangguan tersebut dan tidak segera dihilangkan, akan terjadi perbedaan yang besar antara daya input mekanis dan daya output listrik dari generator, kelebihan atau kekurangan input daya mekanis terhadap sistem dapat menyebabkan terjadinya percepatan atau perlambatan putaran rotor generator yang akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Kehilangan sinkronisasi disini didefinisikan sebagai ketidakseimbangan antara daya pemangkit dan beban menimbulkan suatu keadaan *transient* yang menimbulkan peristiwa ayunan rotor dalam generator. Sebagai contoh adalah gangguan hubung singkat. Ketika terjadi hubung singkat, akan terjadi lonjakan arus yang sangat besar pada bus yang terkena gangguan yang mengakibatkan perbedaan daya input mekanis dan elektrik pada generator dan menimbulkan perbedaan sudut rotor akibat dari percepatan rotor. Apabila setelah masa *transient* sudut rotor bisa mencapai kondisi kestabilan baru maka sistem dikatakan stabil. Sedangkan apabila setelah masa *transient* rotor tetap berosilasi dan tidak mencapai sudut kestabilan baru maka sistem dikatakan tidak stabil.

Pada waktu gangguan terjadi, rele pengaman akan bekerja untuk membuka *circuit breakers* dalam waktu kurang dari 200-300 ms. Akan

tetapi hal ini tidak menjamin sistem akan kembali dalam kondisi stabil dikarenakan adanya waktu pemutus kritis / *critical clearing time* (CCT) pada sistem tenaga listrik. CCT adalah perhitungan batas waktu kritis setelah terjadi gangguan dimana saat terjadi gangguan harus diputus sebelum nilai CCT agar sistem dapat kembali stabil. Apabila *circuit breaker* dan gangguan diputus lebih dari CCT maka sistem tidak dapat kembali stabil. Tentunya pada masing-masing karakteristik gangguan hubung singkat memiliki nilai waktu kerja rele pengaman yang berbeda. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis untuk mengetahui nilai waktu kerja rele pengaman yang mempengaruhi hasil dari nilai CCT yang didapatkan pada masing-masing karakteristik gangguan hubung singkat.

Berbeda dengan metode simulasi konvensional, formulasi metode ini berdasarkan pada batas nilai permasalahan agar secara langsung mendapatkan nilai pasti dari CCT. Metode ini berdasarkan pada perhitungan *critical trajectory*, dimana *trajectory* tersebut dimulai pada saat terjadi gangguan hingga mencapai kondisi titik akhir yang disebut *Unstable Equilibrium Point* yang diperoleh melalui kondisi *loss of synchronization*. Sehingga *critical trajectory* dan CCT dapat dihitung secara bersamaan. Metode yang telah ada hingga sekarang dalam mendapatkan *critical trajectory* adalah dengan mendefinisikan kondisi titik akhir dari *trajectory* tersebut, yaitu pada titik kritis karena hilangnya sinkronisasi.

1.2 Perumasan Masalah

Permasalahan utama yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah menghitung nilai CCT secara langsung pada sistem multimesin dengan menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* pada sistem 3 generator-9 bus dan sistem 7 generator-57 bus tanpa *damping* dan menggunakan *damping* dengan jenis gangguan hubung singkat antara lain, satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, hubung singkat antar fasa dan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menentukan nilai dari waktu pemutus kritis / *critical clearing time* (CCT) menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* pada sistem multimesin untuk berbagai jenis gangguan hubung singkat yang kerap terjadi pada sistem tenaga listrik dan menyebabkan adanya

ketidakseimbangan pada masing-masing fasa sehingga nilai CCT dapat dijadikan sebagai acuan waktu kerja rele pengaman untuk membuka *circuit breakers* (CB). Dari hasil penelitian ini diharapkan mampu menjadi referensi untuk perhitungan nilai CCT pada beberapa kondisi gangguan hubung singkat.

1.4 Metodologi

1. Studi Literatur

Penulis melakukan studi terhadap berbagai referensi-referensi penelitian, jurnal ilmiah (*paper*) yang berkaitan tentang stabilitas *transient*, gangguan hubung singkat dan referensi-referensi lain yang dianggap perlu untuk mendapatkan bahan penelitian yang akan membantu pengerjaan tugas akhir.

2. Pemodelan Sistem

Melakukan studi transien pada sistem *multi-machine* saat terjadi gangguan untuk kemudian dibuat pemodelan berdasarkan parameter-parameter sistem yang ada seperti generator, transmisi serta bus yang ada dalam sistem.

3. Pembuatan Program

Membuat diagram alir dari pemodelan sistem untuk mendapatkan program yang sesuai untuk analisis perhitungan CCT pada sistem multi mesin dalam beberapa kondisi gangguan hubung singkat

4. Perhitungan CCT

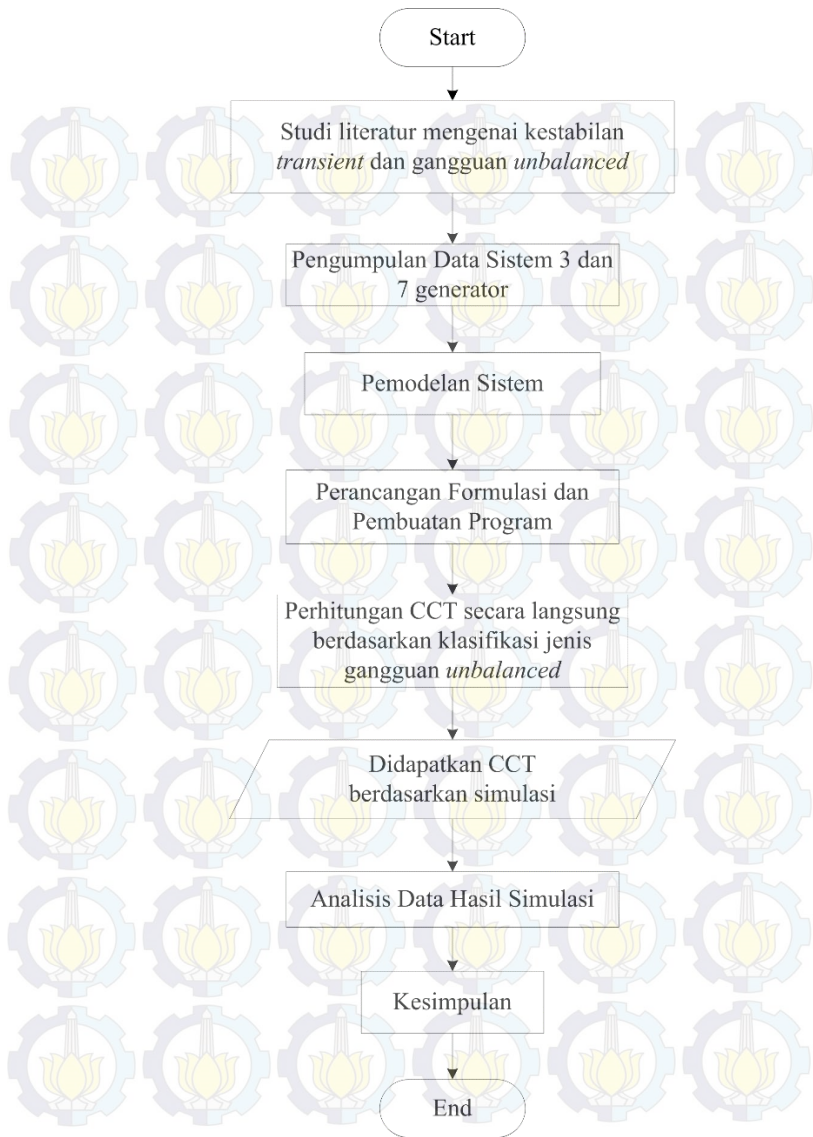
Melakukan perhitungan terhadap formulasi yang telah diketahui untuk menunjang pemodelan sistem dan simulasi. Ada beberapa kondisi nilai CCT yang akan dihitung berdasarkan jenis gangguan hubung singkat yang terjadi seperti gangguan hubung singkat satu fasa, dua fasa, dan tiga fasa

5. Analisis Data

Dari hasil CCT yang telah didapatkan melalui perhitungan dan hasil simulasi akan dilakukan analisis. Data yang akan dianalisis adalah mencakup parameter-parameter CCT pada kestabilan *transient*, sehingga didapatkan pemodelan sistem yang paling baik.

6. Kesimpulan

Kesimpulan didapatkan dari keseluruhan analisis dalam penelitian serta hasil yang didapatkan dari simulasi program. Selain itu, akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.



Gambar 1.1. Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi atas lima bab yang masing-masing bab memiliki pembahasan sebagai berikut :

Bab I : Pendahuluan

Pada Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang masalah yang akan dibahas dalam Tugas Akhir, kemudian perumusan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian serta sistematika penulisan dalam tugas akhir.

Bab II : Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Bab ini memaparkan mengenai berbagai teori tentang kestabilan sistem tenaga listrik, analisis aliran daya serta penjelasan mengenai metode modifikasi *loss of synchronization*, dan hubungan perhitungan CCT dengan proses stabilitas sistem tenaga listrik.

Bab III : Pemodelan Sistem

Pada bab ini memaparkan mengenai pemodelan dari sistem yang akan dianalisis, serta berbagai fomulasi yang akan digunakan untuk proses perhitungan CCT dalam berbagai kondisi gangguan *Short circuits*.

Bab IV : Simulasi dan Analisis

Bab ini akan membahas simulasi dari pemodelan sistem yang telah dibuat untuk menentukan nilai CCT yang akan dianalisis. Proses analisis yang dilakukan meliputi keseluruhan nilai CCT yang didapatkan dalam berbagai macam jenis gangguan *short circuits* untuk tujuan pemodelan sistem yang lebih baik

Bab V : Penutup

Untuk Bab terakhir akan diberikan kesimpulan atas penelitian yang telah dilakukan yang merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu juga akan diberikan saran dan masukan untuk perbaikan pengembangan penelitian yang akan dilakukan kedepannya berkaitan dengan keseluruhan penelitian.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dalam Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan Gambaran mengenai perhitungan CCT dalam berbagai kondisi gangguan *short circuits* yang kerap terjadi dalam sistem tenaga listrik sehingga mampu memberikan Gambaran mengenai kondisi kestabilan sistem tenaga listrik akibat adanya mekanisme transien yang terjadi secara tiba-tiba ketika terjadi gangguan. Selain itu, hasil perhitungan ini diharapkan mampu menjadi sebuah referensi untuk penelitian mengenai CCT lebih lanjut.

BAB 2

KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK DAN GANGGUAN *UNBALANCED*

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai sebuah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk tetap kembali pada kondisi semula dengan mempertahankan nilai operasi kesetimbangan setelah terjadi gangguan secara fisik, sehingga kesatuan daripada sistem tetap terjaga. Kesatuan dari sistem diartikan sebagai kondisi dimana sistem tenaga listrik tidak terjadi peristiwa generator atau beban trip, kecuali untuk permasalahan isolasi atau untuk operasi pemeliharaan peralatan [1]. Deskripsi ini berlaku untuk sistem tenaga listrik yang saling interkoneksi dengan satu generator atau grup generator. Dalam sebuah sistem tenaga listrik terdapat peristiwa variasi beban dinamis yang berubah setiap detiknya. Variasi beban menyebabkan pasokan daya dari generator akan mengalami perubahan setiap detiknya dengan menyesuaikan variasi beban. Dalam kondisi seperti ini sistem diharuskan mampu untuk menyesuaikan pasokan daya dari generator yang disesuaikan dengan variasi kebutuhan beban dengan tujuan untuk mempertahankan kontinuitas operasi sistem tenaga listrik. Sebuah sistem tenaga listrik memungkinkan adanya gangguan dengan skala kecil maupun besar. Gangguan skala kecil bisa disebabkan oleh adanya perubahan beban secara kontinu yang menyebabkan pengaturan sistem harus dirubah. Selain gangguan tersebut, sistem juga harus mampu mempertahankan kestabilan dalam kondisi gangguan besar seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi ataupun rugi-rugi dari generator besar. Apabila sistem mengalami gangguan besar dapat mengakibatkan pemutusan pada saluran yang terkena gangguan yang berakibat pada generator yang kehilangan titik kestabilannya.

Kriteria utama kestabilan adalah bagaimana mesin dapat mempertahankan sinkronisasi pada akhir periode transien. Pada operasi normal, terdapat keseimbangan antara daya input mekanis yang diterima oleh prime mover generator dengan daya output listrik yang dihasilkan pada suatu sistem. Generator berputar pada kecepatan sinkron, saat terjadi gangguan pada sistem, sesaat akan terjadi perbedaan antara daya *output* dengan daya *input*, jika terjadi gangguan maka generator akan mengalami

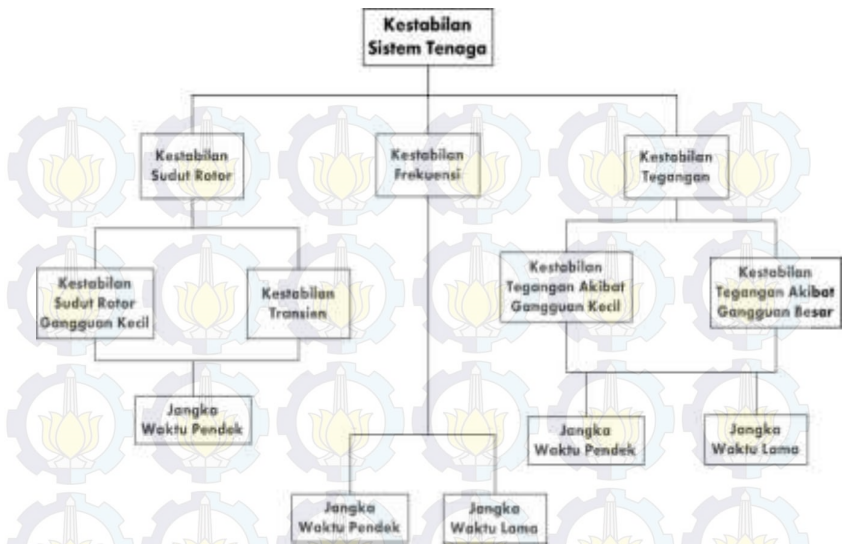
perlambatan pada putaran rotor atau sebaliknya bergantung dari nilai perubahan daya *input* dan daya *output* suatu sistem tenaga listrik. Perlambatan atau percepatan pada generator akan mengakibatkan pergeseran sudut rotor yang menyebabkan generator berada pada posisi yang tidak sinkron. Jika respon osilasi sistem selama periode transien yang mengikuti gangguan teredam, maka sistem dalam kondisi stabil, jika tidak berarti sistem kehilangan kestabilan.

2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Pada dasarnya, kestabilan sistem tenaga adalah satu kesatuan masalah. akan tetapi, berbagai bentuk ketidakstabilan yang dapat dialami oleh sistem tidak dapat dipahami dan ditangani secara efektif dengan memperlakukan secara kondisi umum karena hal itu merupakan sebuah dimensi yang besar dan memiliki banyak kompleksitas masalah. Untuk mempermudah dalam proses analisis masalah mengenai stabilitas sistem tenaga, diperlukan pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik. Berdasar pada referensi [2] kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Kestabilan Sudut Rotor
2. Kestabilan Frekuensi
3. Kestabilan Tegangan.

Pada Gambar 2.1 ditunjukkan pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik guna mempermudah proses analisis permasalahan stabilitas.



Gambar 2.1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari mesin sinkron untuk mempertahankan kesinkronannya dengan cara menjaga keseimbangan antara torsi mekanik dengan torsi elektrik. Sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri atas interkoneksi antara mesin-mesin sinkron. Pada operasi normal, mesin-mesin tersebut bekerja dalam keadaan sinkron, yaitu berusaha untuk saling mempertahankan frekuensi sinkron dan mempertahankan perbedaan sudut daya konstan antara masing-masing mesin.

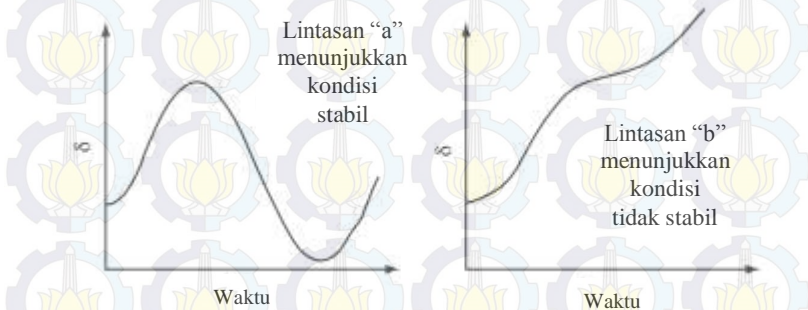
Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor gangguan kecil

Saat ini, dalam operasi sistem tenaga, kestabilan sudut rotor gangguan kecil biasanya berhubungan dengan kondisi *damping* untuk meredam osilasi. Gangguan kecil bisa berupa pelepasan beban yang menyebabkan variasi dinamis dari sebuah sistem tenaga. Jangka waktu dalam studi stabilitas gangguan kecil berada pada kurun waktu 10-20 detik setelah gangguan

2. Kestabilan Transien

Kestabilan transien atau kestabilan sudut rotor gangguan besar adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk tetap dalam kondisi sinkron ketika mengalami gangguan besar. Gangguan ini dapat mencakup gangguan hubung singkat, atau kehilangan pembangkit. Respon sistem yang dihasilkan ketika terjadi gangguan transien adalah adanya penyimpangan dari sudut rotor generator karena pengaruh dari ketidaklinearan sudut daya. Studi untuk transien memiliki jangka waktu 3-5 detik, untuk gangguan sistem yang sangat besar dapat mencapai kurun waktu 10-20 detik.



Gambar 2.2. Grafik lintasan sudut rotor terhadap waktu dalam kondisi transien stabil dan tidak stabil

Dalam kestabilan transien sistem tenaga listrik, grafik analisis dinyatakan dalam bentuk bidang sudut rotor generator (δ) terhadap waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Grafik tersebut merupakan suatu "kurva ayunan" yang diplot untuk generator ketika terjadi gangguan pada sistem. Kestabilan sistem dapat dilihat apakah sudut rotor generator kembali ke nilai awal dan berosilasi di sekitar titik keseimbangan baru dalam lintasan "a" atau apakah sudut rotor meningkat secara kontinu seperti dalam lintasan "b." Kasus yang pertama atau dalam lintasan "a" dianggap dalam kondisi stabil, dan kasus terakhir atau dalam lintasan "b" berada dalam kondisi tidak stabil.

Pada umumnya respon sudut rotor dalam kondisi stabil akan berosilasi hingga mencapai amplitude maksimum, kemudian menurun dalam kondisi *steady state*. Dalam kondisi tidak stabil respon sudut rotor dapat dijelaskan melalui dua peristiwa yaitu *first swing instability* ketika

sudut rotor meningkat melebihi nilai maksimum karena kurangnya torsi sinkronisasi. Dan yang kedua adalah *multi swing instability* terjadi ketika osilasi sudut rotor terus meningkat melebihi nilai maksimum hingga kehilangan sinkronisasi.

2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi pada nilai tertentu setelah setelah terjadi gangguan secara sistemik yang mengakibatkan ketidakseimbangan signifikan antara proses pembangkitan dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan / mengembalikan keseimbangan antara proses pembangkitan pada sistem dan beban, nilai loss beban semaksimal mungkin. Ketidakstabilan frekuensi dapat mengakibatkan adanya bentuk ayunan frekuensi berkelanjutan yang menyebabkan terjadinya trip pada generator atau beban.

2.2.3 Kestabilan Tegangan

Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan nilai awal tegangan operasi untuk semua bus dalam sistem setelah mengalami gangguan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan / mengembalikan keseimbangan antara permintaan dan pasokan beban dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan terjadinya fluktuasi tegangan secara tiba-tiba dari beberapa bus yang ada dalam sistem. Kemungkinan akibat dari ketidakstabilan tegangan hilangnya beban dalam suatu daerah, atau terjadinya trip pada sistem transmisi dan elemen lain karena gagal berfungsinya sistem proteksi. Kehilangan sinkronisasi dari beberapa generator memungkinkan untuk terjadi sebagai akibat dari pemadaman tersebut atau dari kondisi operasi yang salah. Faktor utama terjadinya ketidakstabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat diluar kapasitas daya reaktif yang ada pada sistem.

Kestabilan tegangan dibagi menjadi dua, yaitu :

1. Kestabilan tegangan gangguan kecil
Kestabilan tegangan gangguan kecil berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan berikut gangguan kecil seperti perubahan inkremental beban sistem. Bentuk stabilitas ditentukan oleh karakteristik beban, kontrol

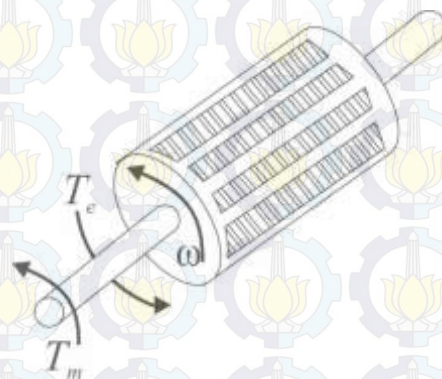
secara kontinu dan kontrol diskrit pada suatu saat waktu tertentu.

2. Kestabilan tegangan gangguan besar

Kestabilan tegangan gangguan besar berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan untuk tetap dalam kondisi awal setelah terjadi gangguan besar seperti kesalahan sistem, pelepasan generator, atau peristiwa kontingensi pada sirkuit. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik beban suatu sistem tenaga listrik dan interaksi secara berkelanjutan dari proses sistem kontrol dan proteksi. Jangka waktu studi untuk masalah ini bias dimulai dari beberapa detik sampai puluhan menit.

2.3 Persamaan Ayunan

Pada sebuah operasi sistem tenaga listrik, torsi mekanik dan elektrik dituntut untuk memiliki nilai yang sama agar terjadi keseimbangan dan stabilitas sistem tetap terjaga. Akan tetapi, ketika terjadi gangguan akan terjadi perubahan secara langsung terhadap kedua torsi tersebut yang mengakibatkan keseimbangan kedua torsi tersebut terganggu sehingga menimbulkan percepatan atau perlambatan putaran rotor generator.



Gambar 2.3. Arah perputaran torsi mekanis dan elektris dari rotor generator.

Gambar 2.3 menjelaskan putaran rotor pada generator dengan membandingkan arah perputaran torsi mekanis dan elektris dari generator tersebut. Untuk operasi *steady state* nilai T_m (torsi mekanis) dan T_e adalah sama, sehingga rotor tidak terjadi percepatan atau perlambatan yang

mengakibatkan nilai T_a (torsi percepatan) bernilai nol. Secara umum persamaan untuk torsi tersebut adalah sebagai berikut :

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Dimana :

T_a = Torsi percepatan/perlambatan, dalam satuan N-m

T_m = Torsi mekanik, dalam satuan N-m

T_e = Torsi elektromagnetik, dalam satuan N-m

Persamaan ayunan didasarkan pada sebuah prinsip dalam dinamika yang menyatakan bahwa torsi percepatan adalah hasil kali dari momen inersia rotor dan percepatan sudutnya. Ketika sistem mengalami gangguan maka akan terdapat perbedaan nilai sehingga akan terdapat nilai T_a (torsi percepatan) yang mengakibatkan terjadinya perbedaan sudut rotor pada generator, didefinisikan melalui persamaan berikut :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

Dimana :

J : Momen kelembaman total dari massa rotor dalam satuan $kg \cdot m^2$

θ_m : Pergeseran sudut dari rotor dalam satuan radian mekanis

t : Waktu dalam detik(*second*)

Gambar 2.3 Menunjukkan bahwa rotor berputar dalam arah putaran θ_m positif. Nilai dari θ_m diukur terhadap sumbu pedoman yang diam pada stator, maka θ_m adalah nilai absolut dari sebuah sudut rotor. Karena itu pula θ_m akan terus bertambah dengan waktu. Dalam hal pengukuran nilai θ_m diukur terhadap sumbu pedoman yang berputar terhadap kecepatan sinkron. Oleh karena itu dapat didefinisikan

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.3)$$

Dengan menurunkan persamaan 2.3 terhadap waktu dalam dua kali penurunan didapatkan

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (2.4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.4) kedalam persamaan (2.2) maka didapatkan

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.5)$$

Kita ingat dari hukum dinamika dasar bahwa nilai daya adalah sama dengan momen-putar dikalikan dengan kecepatan sudut. Dengan mengalikan persamaan (2.2) dengan nilai ω_m , dapat diperoleh

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.6)$$

Dimana nilai P_m adalah daya masukan mekanis ke mesin dikurangi dengan rugi-rugi perputasan sedangkan P_e adalah daya elektris dari mesin dan P_a adalah daya percepatan yang menjelsakan setiap ketidakseimbangan antara kedua daya tersebut. Koefisien $J \omega_m$ adalah momen sudut rotor pada kecepatan sinkron. Momen ini dinyatakan dengan M dan disebut sebagai *inertia constant*.

Dalam sebuah data mesin diberikan satu konstanta inersia yang disebut H yang didefinisikan sebagai energi kinetik dalam satuan watt-second. Secara matematis konstanta tersebut dapat didefinisikan sebagai berikut

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad (2.7)$$

Dengan S merupakan nilai MVA Base dalam suatu sistem tenaga listrik.

Melalui substitusi persamaan (2.7) dengan persamaan (2.6) didapatkan persamaan baru sebagai berikut

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.8)$$

Perhatikan bahwa nilai δ_m dinyatakan dalam satuan radian mekanis sedangkan nilai ω_{sm} dinyatakan dalam bentuk radian mekanis per detik. Oleh karena itu persamaan (2.8) jika dikonversikan dalam satuan per unit, akan menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) adalah yang dimaksud dengan persamaan ayunan dalam sebuah mesin. Persamaan ayunan adalah persamaan dasar yang mengatur dinamika/ pergerakan dari putaran sebuah mesin sinkron dalam praktik studi kestabilan sistem tenaga listrik.

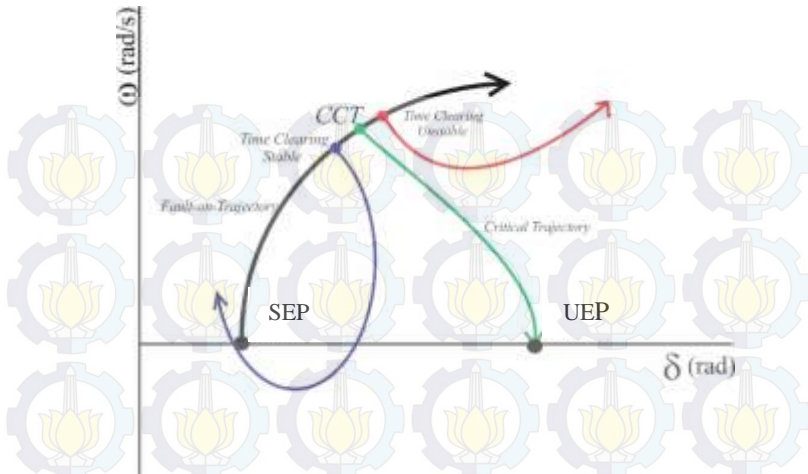
Jika persamaan (2.9) kita konversikan menjadi sebuah persamaan differensial orde-pertama maka dapat menghasilkan

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (2.10)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.11)$$

Jika dalam sebuah persamaan ayunan diselesaikan, maka akan diperoleh rumusan untuk nilai δ sebagai sebuah fungsi waktu. Grafik penyelesaian ini dinamakan dengan *swing curve* mesin dan dengan menelaah lebih lanjut kurva tersebut akan terlihat bahwa mesin akan tetap sinkron sekali pun terjadi gangguan.

2.4 Critical Trajectory



Gambar 2.4. Lintasan kritis untuk sistem single machine tanpa *damping*

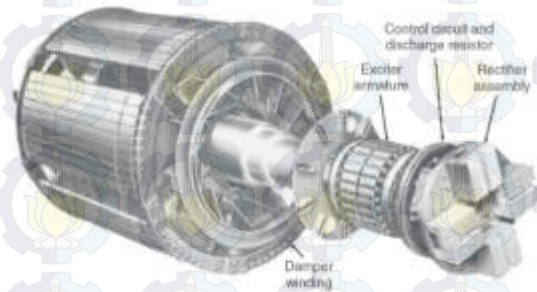
Sebuah lintasan kritis (*critical trajectory*) adalah lintasan yang dimulai dari titik mulai lintasan terjadinya gangguan (*fault on trajectory*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasinya (*loss of synchronization*). Berdasarkan referensi [5]-[6] dijelaskan bahwa untuk Gambar 2.4 diilustrasikan sebuah lintasan yang terjadi pada kondisi mesin tunggal tanpa kumparan peredam.

Terdapat empat jenis lintasan untuk kondisi tersebut. Yang pertama adalah lintasan ketika terjadinya gangguan atau *fault-on-trajectory* yang digambarkan dalam grafik warna hitam dan dimulai dari *Stable Equilibrium Point (SEP)*. Selanjutnya adalah yang merupakan lintasan kondisi stabil dimana gangguan diputus oleh CB kurang dari nilai CCT (*Critical Clearing Time*) dalam sistem dan akan mengalami osilasi mengelilingi nilai SEP (*Stable Equilibrium Point*) yang digambarkan oleh grafik hijau. Selanjutnya adalah lintasan dimana sistem kehilangan sinkronisasinya dimana gangguan diputus oleh CB lebih dari nilai CCT (*Critical Clearing Time*) dalam sistem digambarkan oleh grafik warna merah. Untuk lintasan yang terakhir merupakan lintasan kritis atau *critical trajectory* untuk kondisi stabil yang merupakan perbatasan antara kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem sesuai dengan nilai CCT yang didapat dan kemudian akan mencapai titik kritis yang disebut UEP (*Unstable Equilibrium Point*).

Dari lintasan ini dapat dilihat batas kestabilan suatu sistem tenaga listrik dan digunakan untuk meminimalisasi masalah yang terjadi pada perhitungan nilai UEP (*Unstable Equilibrium Point*) sehingga didapatkan nilai CCT untuk mencapai kestabilan pada sistem tenaga listrik.

2.5 Damper Winding

Pada umumnya generator sinkron mempunyai kumparan peredam / *damper winding* pada konstruksi rotornya. Kumparan peredam ini berupa sebuah konduktor tembaga ataupun aluminium yang dihubungkan singkat pada kedua ujung melalui cincin tembaga/aluminium. Secara umum kumparan peredam berfungsi untuk meningkatkan stabilitas operasi dari generator sinkron ketika generator berputar dalam kecepatan sinkron sebagai peredam isolasi mekanik rotor. Gambar 2.5 diambil dari nssung.tistory.com menjelaskan penampang generator sinkron yang telah terpasang kumparan peredam pada bagian rotor



Gambar 2.5. Penampang generator sinkron dengan damper winding

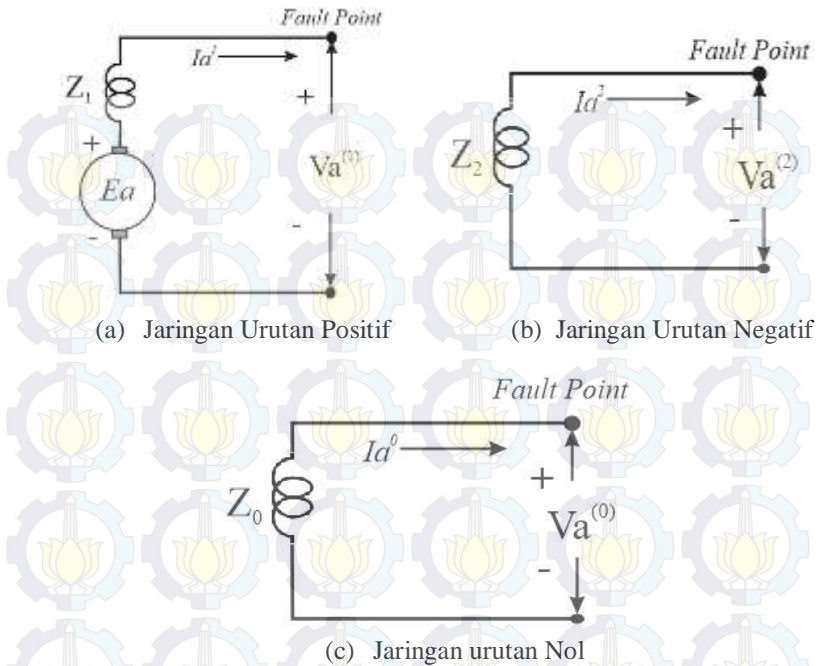
Ketika terjadi gangguan, umumnya rotor pada generator akan mengalami gangguan karena adanya fluktuasi arus yang terjadi didalam sistem sehingga menyebabkan adanya perubahan putaran rotor yang merujuk pada peningkatan kecepatan hingga terjadi peristiwa hilang sinkron. Kumparan peredam disini berperan sebagai peredam putaran rotor sehingga membantu putaran rotor dalam posisi yang stabil. Hal ini disebabkan menginduksi stator agar kecepatan medan putar sama dengan kecepatan putaran rotor.

2.6 Pengertian Gangguan *Unbalanced*

Sebagian besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga adalah gangguan tidak simetri atau tidak setimbang, gangguan ini dapat terdiri dari gangguan hubung singkat tidak simetri, gangguan tidak simetri oleh impedansi. Jenis gangguan hubung singkat tidak simetri bisa terdiri atas gangguan satu fasa ke tanah, gangguan antar fasa, atau gangguan dua fasa ke tanah. Satu atau dua konduktor yang terbuka dapat mengakibatkan timbulnya gangguan tidak simetri pada sistem tenaga, baik melalui pemutusan atau melalui bekerjanya peralatan proteksi dan peralatan lain yang tidak akan membuka sekaligus ketiga fasanya.

Mengingat setiap gangguan tidak simetris menyebabkan arus tidak seimbang mengalir dalam sistem, metode komponen simetris sangat berguna dalam analisis untuk menentukan arus dan tegangan di semua bagian sistem setelah terjadinya gangguan. Dengan mempertimbangkan penerapan teorema *thevenin*, hal ini memungkinkan untuk menemukan arus dalam kondisi gangguan dengan mengganti seluruh sistem dengan generator tunggal dan impedansi seri, dan kita memperlihatkan bagaimana matriks bus impedansi diterapkan pada analisis gangguan tidak simetris.

Ketika terjadi gangguan *unbalanced* pada sebuah sistem tenaga listrik, maka sistem akan membentuk sebuah Gambaran jaringan urutan yang biasa dikenal dengan urutan positif, urutan negatif dan urutan nol, yang memiliki konfigurasi impedansi tersendiri. Secara praktisnya tegangan pada generator hanya dibangkitkan pada keadaan jaringan urutan positif, karena generator dirancang untuk mencatu tegangan tiga fasa seimbang. Oleh karena itu, untuk jaringan urutan positif terdiri dari suatu emf dengan sebuah impedansi pada generator. Untuk konfigurasi jaringan urutan negatif dan urutan nol tidak mengandung emf tetapi hanya terdapat impedansi pada generator. Berdasar referensi [4] penjelasan mengenai konfigurasi impedansi untuk masing-masing jaringan urutan positif, negatif dan urutan nol didefinisikan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Konfigurasi jaringan untuk urutan positif, negatif dan urutan nol

Tanpa melihat jenis gangguan yang terjadi pada terminal generator, dapat digunakan persamaan berikut:

$$Va_1 = Ea - Ia_1 Z_1 \quad (2.12)$$

$$Va_0 = -Ia_0 Z_0 \quad (2.13)$$

$$Va_2 = -Ia_2 Z_2 \quad (2.14)$$

Dimana:

Va_0 : Tegangan yang mengalir pada jaringan urutan nol

Va_1 : Tegangan yang mengalir pada jaringan urutan positif

Va_2 : Tegangan yang mengalir pada jaringan urutan negatif

Ea : Tegangan pada terminal generator

Ia_0 : Tegangan yang mengalir pada jaringan urutan nol

Ia_1 : Tegangan yang mengalir pada jaringan urutan positif

Ia_2 : Tegangan yang mengalir pada jaringan urutan negatif

- Z_0 : Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan
 Z_1 : Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan
 Z_2 : Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

Dari persamaan diatas dapat diturunkan dalam bentuk matriks seperti dibawah ini.

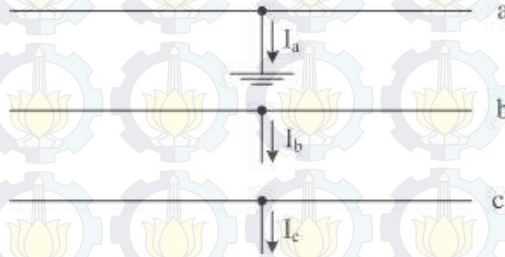
$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Ea \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.7 Gangguan *Unbalanced* Pada Sistem Tenaga

Pada sistem tenaga listrik gangguan hubung singkat kerap terjadi. Salah satu gangguan hubung singkat yang paling sering terjadi adalah gangguan hubung singkat *unbalanced*. Gangguan ini menyebabkan ketidaksimetrian hubungan antara ketiga fasa dalam saluran sistem tenaga listrik. Gangguan ini dapat diklasifikasikan Antara lain gangguan satu fasa ke tanah, gangguan antar fasa dan gangguan dua fasa ke tanah

2.7.1 Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Untuk gangguan satu fasa ke tanah, simulasi untuk ketiga fasa saluran dapat digambarkan melalui Gambar 2.7



Gambar 2.7. Diagram sambungan antar saluran fasa untuk kondisi gangguan satu fasa ke tanah.

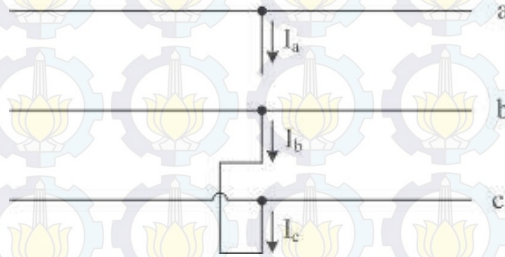
Ketika terjadi kondisi gangguan satu fasa ke tanah maka berlaku persamaan sama seperti persamaan 2.12, akan tetapi untuk E_a digantikan dengan V_f yang merupakan tegangan pada bus yang terkena gangguan sesaat sebelum gangguan terjadi. Sehingga, untuk gangguan satu fasa ke tanah berlaku persamaan:

$$Ia_0 = Ia_1 = Ia_2 \quad (2.16)$$

$$Ia_1 = \frac{V_f}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (2.17)$$

2.7.2 Gangguan Antar Fasa

Untuk jenis gangguan antar fasa, koneksi antar saluran ketika terjadi gangguan didefinisikan oleh Gambar 2.8



Gambar 2.8. Diagram sambungan antar saluran fasa untuk kondisi gangguan antar fasa.

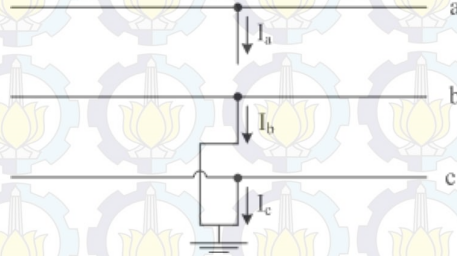
Dengan Gambar diatas, sama dengan kondisi gangguan satu fasa ke tanah, nilai E_a dapat digantikan dengan V_f yang merupakan nilai tegangan pada bus gangguan sebelum terjadinya gangguan. Jadi, persamaan untuk gangguan antar fasa dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Va_1 = Va_2 \quad (2.18)$$

$$Ia_1 = \frac{V_f}{z_1 + z_2} \quad (2.19)$$

2.7.3 Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Untuk suatu gangguan ganda satu fasa ke tanah atau biasa disebut dengan gangguan dua fasa ke tanah, koneksi gangguan dua fasa ke tanah ketika terjadi gangguan dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.9



Gambar 2.9. Diagram sambungan antar saluran fasa untuk kondisi gangguan dua fasa ke tanah

Dengan menghubungkan secara paralel pada titik gangguan terhadap kondisi masing-masing jaringan urutan dapat dihasilkan simulasi persamaan sebagai berikut:

$$Va_0 = Va_1 = Va_2 \quad (2.20)$$

$$Ia_1 = \frac{vf}{z_1 + z_2 z_0 / (z_2 + z_0)} \quad (2.21)$$

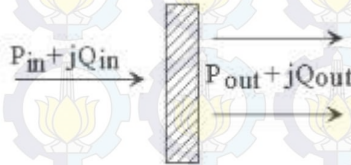
BAB 3

PEMODELAN SISTEM

Dalam memulai analisis kestabilan transien lebih khususnya dalam studi perhitungan CCT dalam beberapa kondisi gangguan *short circuit* diperlukan beberapa parameter-parameter awal guna memudahkan dalam proses perhitungan. Parameter tersebut akan didapatkan melalui beberapa metode operasi matematis.

3.1 Power Flow

Dengan menggunakan analisis *Power Flow*, nilai tegangan serta sudut fasa serta daya pada tiap saluran dapat diketahui. Berdasar pada referensi [6] hasil dari perhitungan aliran daya dapat digunakan sebagai nilai awal atau kondisi awal dari sudut rotor (δ) dan daya mekanis (P_m). Konsep awal dari analisis *Power Flow* adalah nilai daya yang masuk dalam suatu sistem sama dengan nilai daya yang keluar dalam sistem, seperti yang dijelaskan dalam Gambar 3.1



Gambar 3.1. Skema Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik

Langkah awal dalam analisis aliran daya adalah pembacaan data admitansi dari sistem yang kemudian akan dilakukan penomoran pada masing-masing bus yang saling interkoneksi sehingga dapat terbentuk matriks dengan jumlah n bus seperti pada persamaan (3.1)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.1) bias didapatkan nilai admitansi untuk keseluruhan sistem. Melalui nilai daya aktif dan reaktif dalam masing-masing bus dalam sistem tenaga listrik, dapat dituliskan persamaan umum untuk daya kompleksnya adalah sebagai berikut

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n V_i \quad (3.2)$$

Dengan menggunakan analisis daya aktif dan reaktif pada persamaan. Persamaan dalam bentuk *hybrid* untuk daya aktif dalam sistem adalah sebagai berikut

$$P_i = |V_i| \sum_{n=1}^N |V_n| \{G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_n) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)\}. \quad (3.3)$$

Dan untuk daya reaktif

$$Q_i = |V_i| \sum_{n=1}^N |V_n| \{G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_n) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)\}. \quad (3.4)$$

Dengan nilai

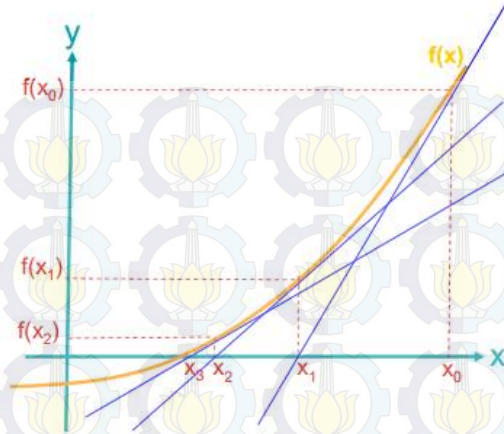
$$G_{ii} = |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} \quad (3.5)$$

Merupakan nilai konduktansi dalam saluran, dan

$$B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$$

merupakan nilai suseptansi dalam saluran transmisi.

Untuk penyelesaian persamaan aliran daya dengan kondisi multimesin, diperlukan sebuah metode operasi matematik yang kompleks. Metode Newton Raphson adalah salah satu metode operasi matematik yang dapat digunakan dalam penyelesaian persamaan aliran daya. Metode ini dikembangkan dari deret *taylor* untuk mendapatkan turunan persamaan matematik dalam penentuan Jacobian matriks yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan operasi.



Gambar 3.2. Ilustrasi Metode Newton Raphson

Pada Gambar 3.1 menjelaskan mengenai ilustrasi metode *newton raphson* dimana terdapat sebuah persamaan garis $f(x)$. Nilai x_0 merupakan inisiasi nilai awal sedangkan x_1 hingga x_3 merupakan percobaan untuk mendekati nilai $f(x)$. Pemodelan metode *newton raphson* menggunakan pendekatan persamaan dari deret *taylor*. Untuk Persamaan dari Deret *Taylor* didefinisikan sebagai berikut

$$F(x) = F(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{dF(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2F(x_0)}{dx^2} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n F(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n = 0 \quad (3.6)$$

Melalui pendekatan linier didapatkan persamaan deret *Taylor* sebagai berikut

$$F(x) = F(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) \quad (3.7)$$

Dengan mengaplikasikan Metode Newton Raphson dalam analisis perhitungan aliran daya dalam sistem multimesin akan didapatkan matriks bujursangkar dengan dimensi $n-1$, dimana n merupakan jumlah generator yang ada dalam sistem dikurangi dengan jumlah *swing bus* yang

ada dalam sistem karena untuk jenis *swing* bus nilai tegangan dan sudut telah diketahui dan bernilai tetap sehingga tidak diperlukan analisis perhitungan, umumnya terdapat satu *swing* bus dalam sistem tenaga listrik. Matriks tersebut dinamakan dengan Jacobian matriks. Berdasarkan referensi [8] Jacobian matriks didefinisikan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \right| \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \right| \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \right| \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \right| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

Gambar 3.3. Konfigurasi Matriks Jacobian untuk analisis aliran daya metode *Newton Raphson*

Dengan melakukan penyederhanaan, matriks diatas dapat disederhanakan menjadi persamaan matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Dengan penjabaran masing-masing komponen

$$H = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad (3.9)$$

$$N = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (3.10)$$

$$J = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad (3.11)$$

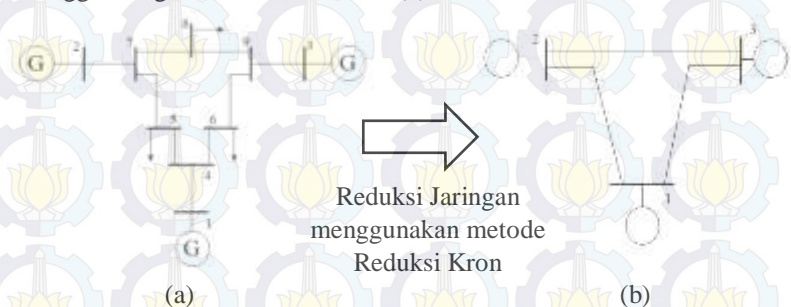
$$L = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (3.12)$$

Selanjutnya dari perkalian matrik Jacobian diatas, akan didapat nilai dari $\Delta\theta_i$ dan $\Delta|V_i|$ yang digunakan sebagai *update* sudut dan magnitudo tegangan tiap bus. Selisih perhitungan tegangan dan sudut pada masing-masing iterasi akan dibandingkan dengan nilai ketelitian pada metode ini. Jika nilai selisih lebih dari batas ketelitian maka iterasi akan dilanjutkan hingga mencapai nilai sama dengan batas iterasinya atau memiliki nilai kurang dari batas iterasinya.

3.2 Reduksi Matriks

Analisis sistem tenaga dalam skala besar diperlukan penyelesaian operasi matematis yang dikonversikan dalam bentuk analisis matriks. Penyederhanaan matriks jaringan menjadi sangat penting ketika berhadapan dengan sistem interkoneksi skala besar untuk mengurangi kompleksitas dari jaringan serta untuk memudahkan penyelesaian analisi matematis. Dalam hal ini metode yang digunakan dalam reduksi jaringan adalah Reduksi Kron.

Reduksi Kron adalah mereduksi matriks admitansi dari bus beban yang dikarenakan tidak ada nilai arus masuk ataupun keluar dari bus tersebut. Nilai arus masuk selalu bernilai nol pada bus jaringan ketika tidak terdapat beban eksternal atau sumber pembangkitan yang terhubung. Gambar 3.4 menjelaskan dua kondisi, untuk Gambar (a) diberikan sistem 3 generator 9 bus dengan bus 1,2 dan 3 merupakan bus generator. Sesuai dengan prinsip reduksi kroon, bus beban dapat direduksi sehingga menghasilkan Gambar 3.4 (b).



Gambar 3.4. (a) Kondisi saluran transmisi awal (b) Saluran transmisi setelah dilakukan reduksi kron

Secara umum, matriks persamaan awal untuk reduksi kron dapat didefinisikan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} & Y_{1(n+1)} & Y_{1(n+2)} & \cdots & Y_{1(n+m)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} & Y_{2(n+1)} & Y_{2(n+2)} & \cdots & Y_{2(n+m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} & Y_{n(n+1)} & Y_{n(n+2)} & \cdots & Y_{n(n+m)} \\ Y_{(n+1)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+1)n} & Y_{(n+1)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+1)(n+m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n+m)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+m)n} & Y_{(n+m)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{n+m} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Dengan deskripsi symbol n merupakan penomoran bus beban dan symbol m merupakan penomoran bus generator. Secara lebih sederhana, persamaan matriks (3.13) dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Dengan melihat kondisi bus beban tidak terdapat aliran arus yang masuk dan keluar, maka dapat diambil kesimpulan nilai I_n bernilai nol. Sehingga persamaan matriks (3.14) dapat dimodelkan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Sehingga hasil perkalian matriks diatas dapat menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0 \quad (3.16)$$

$$V_n = - \begin{pmatrix} Y_{nm} E_m \\ Y_n \end{pmatrix} = -(Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) \quad (3.17)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m = I_m \quad (3.18)$$

Melalui substitusi nilai V_n dari persamaan (3.17) kedalam persamaan (3.18) didapatkan persamaan sebagai berikut

$$I_m = -(Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.19)$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi

$$I_m = Y_{reduksi} E_m \quad (3.20)$$

Dengan nilai:

$$Y_{reduksi} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} \quad (3.21)$$

Dengan menggunakan analisis reduksi matriks diatas, analisis perhitungan untuk sistem yang begitu kompleks menjadi lebih sederhana. Sehingga, dapat mempermudah dalam perhitungan dan analisis kestabilan transien.

3.3 Pemodelan Sistem

Berdasarkan referensi [4] dengan mengacu pada persamaan ayunan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, sistem dapat dimodelkan melalui persamaan masing-masing generator yang diwakili oleh dua persamaan diferensial. *Center of Angle* (COA) dari persamaan ayunan digunakan untuk kedua simulasi yaitu *numerical simulation* dan *direct method simulation* dengan penjabaran persamaan sebagai berikut

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\dot{\omega}_i) \quad (3.22)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i \quad (3.23)$$

Dengan nilai

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.24)$$

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\theta)) \quad (3.25)$$

Dimana :

M_i : Momen inersia ke i

M_T : Momen inersia total

$\dot{\omega}$: percepatan sudut

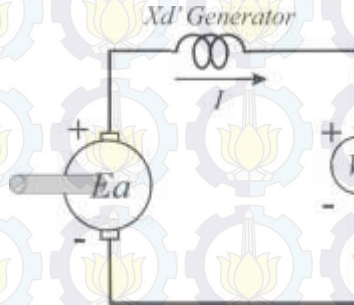
P_m : Daya mekanis

P_e : Daya elektrik

D : Koefisien *Damping*

θ_i : Sudut Rotor

Untuk mencari nilai P_m dan P_e yang ada dalam sistem. Dapat dimodelkan sistem tenaga listrik tanpa *infinite bus* dengan mendefinisikan menggunakan model X_d' dari generaor seperti pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.5. Pemodelan Generator Sinkron

Dengan melihat pemodelan generator diatas, dapat diterapkan Hukum Kircfoff 2 sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut

$$E_a = j x_d' I + V_t \quad (3.26)$$

dan

$$I = \frac{S}{V} \quad (3.27)$$

Persamaan (3.27) dapat disubtitusikan dengan persamaan (3.26) sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$E_a = V_t + j x_d' \cdot \frac{S}{V} \quad (3.28)$$

Dengan menggunakan persamaan dasar perhitungan daya aktif, dapat dihitung daya mekanis dan listrik dari generator. Nilai daya mekanis dan listrik sangat bergantung pada admitansi saluran. Terutama untuk daya listrik harus dimodelkan admitansi saluran setelah terjadi gangguan. Pemodelan admitansi saluran setelah terjadinya gangguan

dapat menggunakan model jaringan urutan positif, negatif dan urutan nol yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya

3.4 Pendefinisian Masalah

Analisis mengenai kestabilan transien dimulai dengan sistem dalam kondisi stabil dengan titik operasi awal (*intial point*) x_{pre} , ketika terjadi gangguan didefinisikan dengan waktu $t=0$. Kemudian sistem diatur dengan persamaan dinamis saat gangguan (*fault-on*) melalui persamaan sebagai berikut

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (3.29)$$

Dimana $x \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N$

Grafik hasil perhitungan persamaan diatas adalah berupa lintasan ketika terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*). Persamaan (3.30) juga dapat ditulis sebagai berikut.

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.30)$$

Dengan nilai $X_F(t; x_{pre}): R \rightarrow R^N$

Ketika gangguan diputus pada waktu $t = \tau$. Sistem kemudian diatur oleh persamaan non linear yang menunjukkan persamaan dinamis setelah terjadinya gangguan (*post-fault*) yang didefinisikan sebagai berikut

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3.31)$$

Hasil dari persamaan diatas adalah berupa lintasan setelah terjadinya gangguan (*post-fault trajectory*). Persamaan (3.31) juga dapat ditulis sebagai berikut

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0): R^N \rightarrow R^N \quad (3.32)$$

Dengan catatan bahwa nilai awal x^0 adalah titik awal pada waktu $t = \tau$ dalam lintasan ketika terjadinya gangguan. Nilai x^0 dapat didefinisikan sebagai berikut

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.33)$$

3.4.1 Runge Kutta Orde 4

Metode Runge Kutta melakukan pendekatan nilai dari persamaan deret *taylor*, meskipun tidak seperti solusi dasar dari persamaan deret *taylor*, Metode Runge Kutta tidak memerlukan sebuah evaluasi eksplisit dari persamaan differensial yang memiliki orde lebih tinggi dari sebelumnya. Akibat dari orde differensial yang tinggi adalah dimasukkannya beberapa evaluasi dari hasil penurunan pertama.

Dengan menggunakan metode runge kutta orde 4 dengan nilai X pada waktu $t = t_0 + \Delta t$ didapatkan persamaan umum sebagai berikut

$$X_{n+1} = X_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.34)$$

Dimana,

$$k_1 = f(X_n, t_n) \Delta t \quad (3.35)$$

$$k_2 = f\left(X_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (3.36)$$

$$k_3 = f\left(X_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (3.37)$$

$$k_4 = f(X_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t \quad (3.38)$$

Keterangan untuk beberapa variable diatas adalah sebagai berikut

k_1 = (Lengkungan saat awal *time step*)* Δt

k_2 = (Pendekatan pertama untuk lengkungan pada pertengahan step)
* Δt

k_3 = (Pendekatan kedua pada lengkungan pada pertengahan step)
* Δt

k_4 = (Lengkungan pada step waktu terakhir)* Δt

3.4.2 Metode Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Untuk menyelesaikan persamaan (3.32) untuk waktu t^k dengan notasi x^k ,. Dapat digunakan persamaan konvensional untuk trapezoidal yang dinotasikan sebagai berikut

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.39)$$

Dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.40)$$

Dengan nilai pangkat k digunakan sebagai *state transmission number* terhadap waktu.

Perhatian mengenai *critical trajectory* harus segera diselesaikan, karena pada dasarnya gangguan dalam sebuah sistem tenaga harus diputus pada nilai CCT dan kemudian nilai *state variable* bertemu pada *critical point* yang telah didefinisikan sebelumnya. Dalam beberapa kasus tertentu nilai *critical point* memiliki nilai sama dengan nilai UEP dan *fault on trajectory* mencapai nilai UEP dalam batas waktu tak berhingga. Gambar 3.6 menunjukkan *critical trajectory* dengan dua buah titik batas yakni x^0 dan x^u , yang merupakan titik awal pada CCT dan critical point. Untuk menghindari perhitungan dengan batas waktu tak berhingga, maka dikembangkan metode baru untuk integrasi numeric. Dengan persamaan untuk jarak dua buah titik sebagai berikut

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (3.41)$$

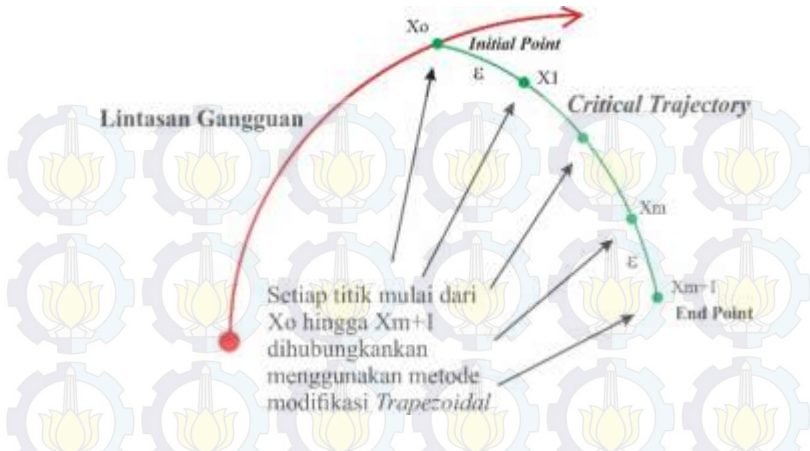
Melalui persamaan transformasi waktu terhadap jarak sebagai berikut

$$(t^{k+1} - t^k) = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.42)$$

Didapatkan persamaan (3.43) yang merupakan hasil substitusi pada persamaan (3.41) dan (3.42)

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.43)$$

Melalui integrasi numeric terhadap waktu yang ditransformasikan kedalam fungsi jarak yang ditunjukkan oleh persamaan (3.43) sangat memungkinkan untuk menggambarkan *critical trajectory* dengan nilai batas yang mempunyai jarak yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6. Konsep Dasar Modifikasi Metode Trapezoidal

3.4.3 Boundary Condition

Berdasarkan Gambar 3.3 *Boundary Condition* diartikan batas nilai awal x^0 dan titik akhir atau critical point x^{m+1} . Titik akhir x^{m+1} akan dijelaskan melalui persamaan minimalisasi ketika kondisi loss of sinkron. Kondisi nilai awal berada dalam *fault-on trajectory* ketika gangguan diputus pada waktu CCT. Nilai awal dapat didefinisikan sebagai berikut

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) = 0 \quad (3.43)$$

Dengan, $CCT = \tau$

3.4.4 Least Square Minimization

Berdasarkan Gambar 3.3 *Least Square Minimization* atau persamaan simultan secara umum adalah sebagai berikut

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \\ x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) = 0 \\ \text{critical point } (x^u) \end{cases} \quad (3.44)$$

Dimana beberapa variabel diatas dikelompokkan sebagai berikut

$$X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau)$$

3.4.5 Metode Newton Raphson

Dalam proses perhitungan CCT terkait perhitungan yang

membutuhkan iterasi digunakan metode Newton Raphson. Koefisien X_s diasumsikan sebagai solusi pada persamaan $G(X)$ pada persamaan 3.44.

$$X_s = X_0 + \Delta X \quad (3.45)$$

Nilai X_s dimisalkan adalah nilai awal X_0 ditambahkan dengan margin error ΔX . Persamaan 3.45 dimasukkan ke dalam fungsi $G(X)$ dan disubstitusikan kedalam deret Taylor dengan hanya mempertimbangkan dua bagian dari deret tersebut, dan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$G(X_0 + \Delta X) \cong G(X_0) + \left[\frac{\partial G(X_0)}{\partial X} \right] \Delta X \quad (3.46)$$

Ketika margin error pada persamaan (3.46) bernilai terlalu kecil atau mendekati nol, dan $G(X_s) = 0$, maka persamaan () dapat ditulis menjadi

$$G(X_0) + J\Delta X \cong 0 \quad (3.47)$$

Dengan J merupakan matriks *Jacobian* dengan nilai sebagai berikut

$$J \equiv \frac{\partial G(X)}{\partial X} \quad (3.48)$$

Untuk nilai *error* didefinisikan melalui koefisien b dengan persamaan $b \equiv G(X_0)$ dengan batas margin error ε melalui persamaan berikut

$$\varepsilon \equiv J\Delta X + b, \quad (3.49)$$

Kemudian margin error ε diminimalisasikan melalui persamaan

$$f = \varepsilon^T \varepsilon \quad (3.50)$$

Persamaan (3.49) dapat disubstitusikan kedalam persamaan (3.50) sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut.

$$f = (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b) \quad (3.51)$$

Persamaan (3.51) dapat disederhanakan dengan menggunakan persamaan turunan, sehingga nilai ΔX dapat ditentukan

$$f' = J^T (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b)J = 0 \quad (3.52)$$

Melalui persamaan diatas, dapat ditentukan nilai ΔX menggunakan persamaan berikut

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T b \quad (3.53)$$

Melalui substitusi persamaan $b \equiv G(X_0)$ ke dalam persamaan (3.53) didapatkan persamaan baru sebagai berikut

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T G(X_0) \quad (3.54)$$

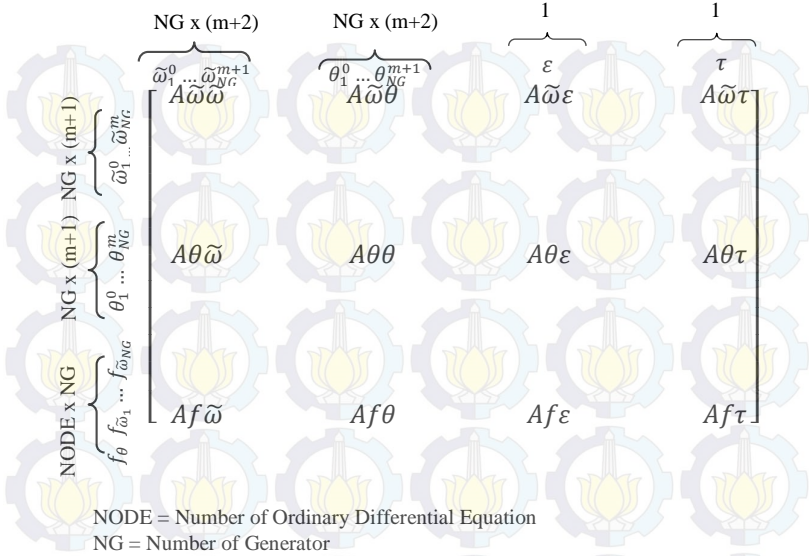
Melalui proses iterasi pada metode *Newton Raphson* didapatkan nilai awal yang baru dengan menambahkan nilai *error* yang didapat (ΔX) dengan koefisien nilai yang lama

$$X_{new} = X_{old} + \Delta X \quad (3.55)$$

3.4.6 Matriks Jacobian

Gambar 3.4 menunjukkan konfigurasi dan dimensi matriks jacobian dengan X_d' model generator tanpa kontroller. Index A menunjukkan X_d' model generator. Jumlah persamaan dan variable didefinisikan melalui jumlah $NODE \times NG \times (m + 2) + 2$ dan $NODE \times NG \times (m + 2)$. Kedua persamaan dan variabel tersebut akan berubah bergantung pada nilai end point yang berbeda setiap metode.

$$NODE \times NG \times (m + 2) + 2$$



Gambar 3.4 Konfigurasi Matriks Jacobian untuk Xd' Model Generator

3.5 Kondisi Kritis Saat Hilangnya Sinkronisasi

Pada kasus sistem *single machine* gaya sinkronisasi akan hilang ketika nilai $\partial T / \partial \theta = 0$ atau $\partial P / \partial \theta = 0$. Dimana T adalah torsi sinkronisasi dan P merupakan daya sinkronisasi sedangkan θ merupakan sudut rotor dari generator [4]. Untuk kondisi multi mesin persamaan hilangnya sinkronisasi dituliskan berdasarkan koefisien matriks hilangnya gaya sinkronisasi

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \quad \text{Dengan } |v| \neq 0 \quad (3.56)$$

Dimana $v \in R^{N_{Gen}}$ merupakan eigenvector yang berhubungan dengan nilai matriks zero eigenvalue $[\partial P / \partial \theta] \in R^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$ dan N_{Gen} adalah jumlah dari generator. Dengan asumsi bahwa kondisi eigenvector

harus sesuai dengan arah perubahan dari θ . Dengan nilai $k_s \in R$ maka nilai *eigenvector* didapatkan melalui persamaan berikut

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (3.57)$$

Berdasarkan persamaan (3.56) dan (3.57) dapat diasumsikan bahwa kondisi tersebut menunjukkan nilai *end point* pada *critical trajectory*. Meskipun hal tersebut tidak sempurna untuk membuktikan kondisi stabilitas untuk sistem dinamis. Sebuah persamaan yang merepresentasikan kondisi stasioner untuk torsi dan daya sinkronisasi adalah sebagai berikut

$$\dot{P} = 0 \quad (3.58)$$

Dengan \dot{P} merupakan fungsi dari rotor generator, dengan persamaan

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (3.59)$$

Untuk metode modifikasi hilangnya sinkronisasi, dalam penentuan nilai *end point* sepanjang *critical trajectory* nilai dan arah *eigenvector* dari θ terhadap posisi UEP (*Unstable Equilibrium Point*) tidak dipertimbangkan. Hal ini mengakibatkan konstanta v dan k yang merupakan parameter nilai dalam *eigenvector* tidak dipertimbangkan dalam proses perhitungan selanjutnya. Oleh karena itu, nilai *end point* dalam metode modifikasi hilangnya sinkronisasi hanya dijabarkan dalam persamaan (3.59)

3.6 Perumusan Minimalisasi

Perumusan masalah dalam kondisi kritis untuk analisis kestabilan transien dalam sistem *multi machine* didefinisikan sebagai berikut

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, k, s, v} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\} \quad (3.60)$$

Dimana $x^k \in R^N, \varepsilon \in R, \tau \in R$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.61)$$

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.62)$$

Dengan nilai batas

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.64)$$

$$\mu^{m+1} = \left[\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot \dot{\theta} \right] \quad (3.65)$$

Setelah dilakukan minimalisasi pada persamaan (3.61) μ^k akan bernilai nol, berdasarkan persamaan trapezoidal yang akan menghubungkan nilai x^k , mulai dari $k=0$ sampai dengan $m+1$. Persamaan (3.64) merupakan kondisi batas untuk nilai inisiasi awal yang digambarkan dalam lintasan gangguan sebagai fungsi waktu pemutusan gangguan.

Untuk persamaan (3.64) merupakan kondisi batas yang lain dengan variabel θ^{m+1} . Dalam metode konvensional μ^k diakumulasikan sebagai peningkatan koefisien k sehingga nilai akhir memiliki *error* yang besar. Di sisi lain, metode yang diusulkan menentukan titik akhir tambahan seperti dalam persamaan (3.65), kemudian menyelesaikan persamaan yang tidak diperlukan sebagai perumusan masalah sehingga nilai μ^k dapat didistribusikan.

Hasil dari persamaan (3.60 – 3.65) didefinisikan sebagai berikut. Penentuan x^k , mulai dari $k = 0$ hingga $m + 1$ merepresentasikan *critical trajectory* yang masing-masing titiknya telah dihubungkan menggunakan metode modifikasi *Trapezoidal*, dimana ε secara otomatis ditentukan ketika jumlah integrasi m telah ditentukan, *CCT* dan titik akhir masing-masing diperoleh sebagai τ dan x^{m+1}

3.7 Perhitungan *Critical Clearing Time*

Dalam penentuan elemen matriks Jacobian yang akan dijadikan sebagai salah satu parameter dalam perhitungan *CCT* secara langsung bergantung pada jenis metode yang digunakan. Untuk metode modifikasi hilangnya sinkronisasi, elemen dalam matriks jacobian didefinisikan melalui beberapa persamaan berikut

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - P_{e_i}^{m+1}(\theta) \quad (3.66)$$

Nilai P_e merupakan daya elektrik pada tiap generator yang didefinisikan menggunakan persamaan berikut

$$\begin{aligned}
 P^{m+1} &= P_{m_i}^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(-\theta_i^{m+1} + \theta_j^{m+1} + \alpha_{ij}^{m+1}) \\
 P^{m+1} &= P_{m_i}^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} \left[Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\delta_i^{m+1} - \delta_j^{m+1}) + \cos(\theta_i^{m+1}) \right] \\
 &\quad \left[Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin(\delta_i^{m+1} - \delta_j^{m+1}) + \sin(\theta_i^{m+1}) \right] \\
 P^{m+1} &= P_{m_i}^{m+1} - G_{ii}^{m+1} (E_i^{m+1})^2 \sum_{l=1}^{NG} \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [E_l^{m+1} E_j^{m+1} (G_{lj}^{m+1} \cos(\theta_l^{m+1}) + \\
 &\quad B_{lj}^{m+1} \sin(\theta_l^{m+1}))] \quad (3.67)
 \end{aligned}$$

Sehingga komponen J_1 pada matriks *Jacobian* menjadi

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_i^{m+1}} & \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} \\ \frac{\partial P_j^{m+1}}{\partial \theta_i^{m+1}} & \frac{\partial P_j^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i^{m+1} \\ \vdots \\ \dot{\theta}_j^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Persamaan (3.68) dapat disederhanakan menjadi

$$J_1 = |Dsa| \times \dot{\theta} \quad (3.69)$$

Untuk koefisien Dsa dapat diturunkan melalui persamaan diferensial berikut

$$Dsa_{ii}^{m+1} = \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_i^{m+1}} \quad (3.70)$$

$$Dsa_{ij}^{m+1} = \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} \quad (3.71)$$

Jadi untuk persamaan (3.69 – 3.71) secara kompleks dapat dituliskan sebagai berikut

$$Dsa_{ii}^{m+1} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1}) - B_{ij}^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1}))] \quad (3.72)$$

$$Dsa_{ij}^{m+1} = E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \sin(\theta_{ij}^{m+1}) - B_{ij}^{m+1} \cos(\theta_{ij}^{m+1}))$$

(3.73)

Penurunan komponen J_1 terhadap θ dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial J_1}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 P^{m+1}}{\partial \theta_i^2} \dot{\theta}^{m+1} + \frac{\partial P}{\partial \theta} \dot{\theta} \quad (3.74)$$

Sehingga melalui persamaan diatas. Konfigurasi Matriks Jacobian untuk perhitungan CCT menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* dapat didefinisikan sebagai berikut

$$2 \times NODE \times NG \times (m+2) + 2$$

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{cccc}
 \overbrace{\omega_0^0 \dots \omega_{NG}^{m+1}}^{NG \times (m+2)} & \overbrace{\theta_1^0 \dots \theta_{NG}^{m+1}}^{NG \times (m+2)} & \overbrace{\varepsilon}^1 & \overbrace{\tau}^1 \\
 A\tilde{\omega}\tilde{\omega} & A\tilde{\omega}\theta & A\tilde{\omega}\varepsilon & A\tilde{\omega}\tau \\
 \overbrace{\theta_1^0 \dots \theta_{NG}^0}^{NG \times m} & A\theta\tilde{\omega} & A\theta\theta & A\theta\varepsilon & A\theta\tau \\
 \overbrace{\varepsilon}^{NG} & A\varepsilon\tilde{\omega} & A\varepsilon\theta & A\varepsilon\varepsilon & A\varepsilon\tau \\
 \overbrace{\tau}^{NG} & A\tau\tilde{\omega} & A\tau\theta & A\tau\varepsilon & A\tau\tau \\
 \overbrace{\text{End point}}^{NG} & & & &
 \end{array} \right] J_1 = |Dsa| \times \dot{\theta}
 \end{array}$$

Gambar 3.7. Konfigurasi Matriks Jacobian untuk perhitungan CCT metode modifikasi *loss of synchronization*



BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

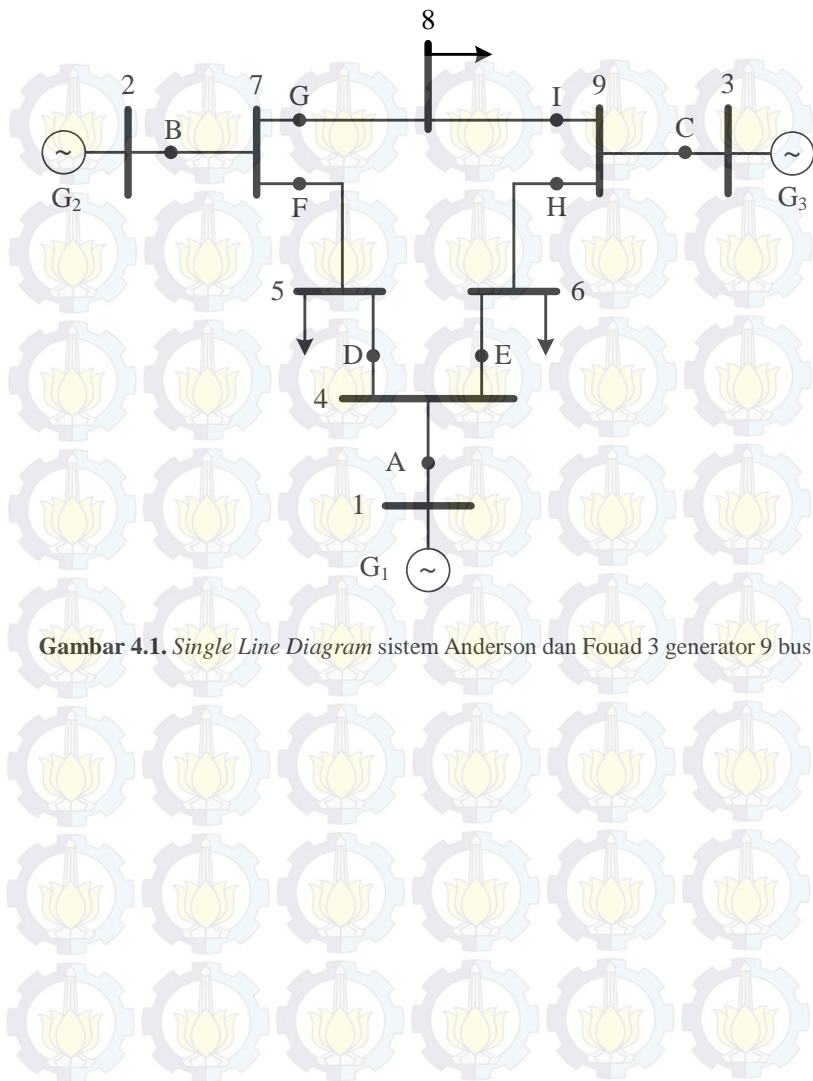
Dalam bab ini akan diberikan hasil simulasi beserta hasil analisis pada perhitungan nilai CCT secara langsung untuk sistem multi mesin. Untuk sistem yang dilakukan analisis adalah sistem Anderson dan Fouad 3 generator 9 bus dan sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damping* dan tanpa *damping*. Analisis perhitungan CCT dilakukan dengan memperhatikan kondisi gangguan hubung singkat yang terjadi dalam saluran transmisi diantaranya gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, tiga fasa ke tanah dan gangguan hubung singkat antar fasa.

Melalui hasil simulasi akan didapatkan beberapa parameter yang nantinya akan digunakan untuk proses perhitungan CCT sesuai dengan metode pengerjaan yang telah dijelaskan oleh bab sebelumnya. Kondisi dan spesifikasi dari perangkat sangat berpengaruh terhadap waktu simulasi. Berikut ini diberikan spesifikasi perangkat yang digunakan dalam pengerjaan simulasi.

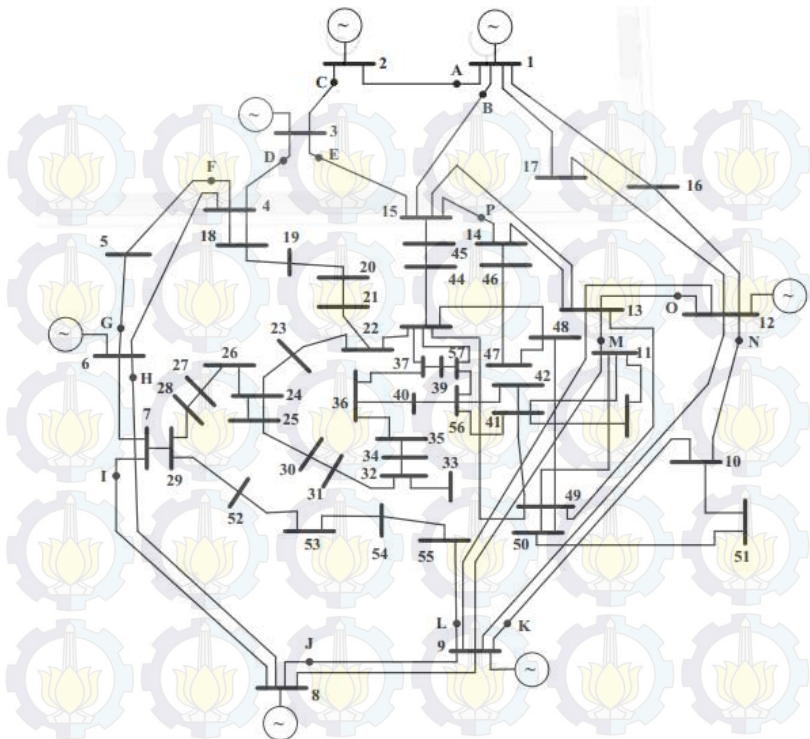
1. *Sistem Manufacture* : TOSHIBA
2. *Sistem Model* : Satellite L635
3. *BIOS* : InsydeH20 Version 1.80
4. *Operating Sistem* : Windows 8 Pro 32-bit (6.2 Build 9000)
5. *Processor* : Intel® Core™ i3 CPU M370
@240 GHZ (4 CPUs), ~2.4 GHz
6. *Product ID* : 00718-70000-00011-AA224
7. *Installed Memory* : 2.00 GB

4.1 Penentuan Parameter Awal Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*)

Untuk sistem yang dilakukan analisis perhitungan CCT digunakan sistem Anderson dan Fouad 3 generator 9 bus dan sistem IEEE 7 generator 57 bus melalui pemodelan beberapa titik gangguan dengan beberapa jenis gangguan hubung singkat tidak seimbang. *Single Line Diagram* untuk sistem 3 generator 9 bus dan sistem IEEE 7 generator 57 bus dimodelkan seperti pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4.1. *Single Line Diagram* sistem Anderson dan Fouad 3 generator 9 bus.



Gambar 4.2. Single Line Diagram sistem IEEE 7 generator 57 bus.

Spesifikasi data parameter saluran transmisi dan data pembangkitan generator serta beban di tiap bus pada sistem 3 generator 9 bus dijelaskan oleh Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 berikut

Tabel 4.1. Data Transmisi untuk Sistem 3 Generator 9 Bus

No.	Line	R (p.u)	X (p.u)	Half Line Charging Susceptance (p.u)
1	1-4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2-7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3-9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4-5	0,0100	0,0850	0,0880

Lanjutan Tabel 4.1. Data Transmisi untuk Sistem 3 Generator 9 Bus

No,	Line	R (p.u)	X (p.u)	Half Line Charging Susceptance (p.u)
5	4-6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5-7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6-9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7-8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8-9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.2. Data tegangan, daya yang dibangkitkan dan beban tiap bus untuk sistem 3 Generator 9 Bus

No.	Tegangan Bus	Power Generated		Beban	
		P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	1,0400	200,00	0,00	0,00	0,00
2	1,0250	163,00	0,00	0,00	0,00
3	1,0250	85,00	0,00	0,00	0,00
4	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,0000	0,00	0,00	125,00	50,00
6	1,0000	0,00	0,00	90,00	30,00
7	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,0000	0,00	0,00	100,00	35,00
9	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00

Dari sistem pada Gambar 4.1 telah diasumsikan beberapa titik sebagai acuan letak terjadinya gangguan untuk setiap bus. Deskripsi untuk masing-masing titik gangguannya adalah sebagai berikut

- A : Titik gangguan diantara bus 1 dan bus 4 dekat bus 1
- B : Titik gangguan diantara bus 2 dan bus 7 dekat bus 2
- C : Titik gangguan diantara bus 3 dan bus 9 dekat bus 3
- D : Titik gangguan diantara bus 4 dan bus 5 dekat bus 4
- E : Titik gangguan diantara bus 4 dan bus 6 dekat bus 4
- F : Titik gangguan diantara bus 5 dan bus 7 dekat bus 7
- G : Titik gangguan diantara bus 7 dan bus 8 dekat bus 7

- H : Titik gangguan diantara bus 9 dan bus 6 dekat bus 9
 I : Titik gangguan diantara bus 9 dan bus 8 dekat bus 9

Untuk sistem IEEE 6 generator 30 bus, data parameter saluran transmisi, tegangan bus serta pembebanan generator diberikan melalui Tabel berikut

Tabel 4.3. Data Transmisi untuk Sistem IEEE 7 Generator 57 bus

No.	Line	R(p.u.)	X(p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
1.	1-2	0,0083	0,0280	0,0645
2.	2-3	0,0298	0,0850	0,0409
3.	3-4	0,0112	0,0366	0,0190
4.	4-5	0,0625	0,1320	0,0129
5.	4-6	0,0430	0,1480	0,0174
6.	6-7	0,0200	0,1020	0,0138
7.	6-8	0,0339	0,1730	0,0235
8.	8-9	0,0099	0,0505	0,0274
9.	9-10	0,0369	0,1679	0,0220
10.	9-11	0,0258	0,0848	0,0109
11.	9-12	0,0648	0,2950	0,0386
12.	9-13	0,0481	0,1580	0,0203
13.	13-14	0,0132	0,0434	0,0055
14.	13-15	0,0269	0,0869	0,0115
15.	1-15	0,0178	0,0910	0,0494
16.	1-16	0,0454	0,2060	0,0273
17.	1-17	0,0238	0,1080	0,0143
18.	3-15	0,0162	0,0530	0,0272
19.	4-18	0,0000	0,2423	0,0000
20.	5-6	0,0302	0,0641	0,0062
21.	7-8	0,0139	0,0712	0,0097
22.	10-12	0,0277	0,1262	0,0164
23.	11-13	0,0223	0,0732	0,0094
24.	12-13	0,0178	0,0580	0,0302

Lanjutan Tabel 4.3. Data Transmisi untuk Sistem IEEE 7 Generator 57 bus

No.	Line	R(p.u.)	X(p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
25.	12-16	0,0180	0,0813	0,0108
26.	12-17	0,0397	0,1790	0,0238
27.	14-15	0,0171	0,0547	0,0074
28.	18-19	0,4610	0,6850	0,0000
29.	19-20	0,2830	0,4340	0,0000
30.	20-21	0,0000	0,7767	0,0000
31.	21-22	0,0736	0,1170	0,0000
32.	22-23	0,0099	0,0152	0,0000
33.	23-24	0,1660	0,2560	0,0042
34.	24-25	0,0000	0,6028	0,0000
35.	24-26	0,0000	0,0473	0,0000
36.	26-27	0,1650	0,2540	0,0000
37.	27-28	0,0618	0,0954	0,0000
38.	28-29	0,0418	0,0587	0,0000
39.	7-29	0,0000	0,0648	0,0000
40.	25-30	0,1350	0,2020	0,0000
41.	30-31	0,3260	0,4970	0,0000
42.	31-32	0,5070	0,7550	0,0000
43.	32-33	0,0392	0,0360	0,0000
44.	32-34	0,0000	0,9530	0,0000
45.	34-35	0,0520	0,0780	0,0016
46.	35-36	0,0430	0,0537	0,0008
47.	36-37	0,0290	0,0366	0,0000
48.	37-38	0,0651	0,1009	0,0010
49.	37-39	0,0239	0,0379	0,0000
50.	36-40	0,0300	0,0466	0,0000
51.	22-38	0,0192	0,0295	0,0000
52.	11-41	0,0000	0,7490	0,0000
53.	41-42	0,2070	0,3520	0,0000
54.	41-43	0,000	0,4120	0,0000
55.	38-44	0,0289	0,0585	0,0010

Lanjutan Tabel 4.3. Data Transmisi untuk Sistem IEEE 7 Generator 57 bus

No.	Line	R(p.u.)	X(p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
56.	15-45	0,000	0,1042	0,0000
57.	14-46	0,000	0,0735	0,0000
58.	46-47	0,0230	0,0680	0,0016
59.	47-48	0,0182	0,0233	0,0000
60.	48-49	0,0834	0,1290	0,0024
61.	49-50	0,0801	0,1280	0,0000
62.	50-51	0,1386	0,2200	0,0000
63.	10-51	0,0000	0,0712	0,0000
64.	13-49	0,0000	0,1910	0,0000
65.	29-52	0,1442	0,1870	0,0000
66.	52-53	0,0762	0,0984	0,0000
67.	53-54	0,1878	0,2320	0,0000
68.	54-55	0,1732	0,2265	0,0000
69.	11-43	0,0000	0,1530	0,0000
70.	44-45	0,0624	0,1242	0,0020
71.	40-56	0,0000	1,1950	0,0000
72.	41-56	0,5530	0,5490	0,0000
73.	42-56	0,2125	0,3540	0,0000
74.	39-57	0,0000	1,3550	0,0000
75.	56-57	0,1740	0,2600	0,0000
76.	38-49	0,1150	0,1770	0,0030
77.	38-48	0,0312	0,0482	0,0000
78.	9-55	0,0000	0,1205	0,0000

Tabel 4.4. Data tegangan, daya yang dibangkitkan dan beban tiap bus untuk sistem 7 Generator 57 Bus

No.	Tegangan Bus	Power Generated		Beban	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1,0400	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,0100	0,00	0,00	3,00	88,00
3	0,9850	40,00	0,00	41,00	21,00

Lanjutan Tabel 4.4. Data tegangan, daya yang dibangkitkan dan beban tiap bus untuk sistem 7 Generator 57 Bus

No.	Tegangan Bus	Power Generated		Beban	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
4	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,0000	0,00	0,00	13,00	4,00
6	0,9800	0,00	0,00	75,00	2,00
7	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,0050	450,00	0,00	150,00	22,00
9	0,9800	0,00	0,00	121,00	26,00
10	1,0000	0,00	0,00	5,00	2,00
11	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,0150	310,00	0,00	377,00	24,00
13	1,0000	0,00	0,00	18,00	2,30
14	1,0000	0,00	0,00	10,50	5,30
15	1,0000	0,00	0,00	22,00	5,00
16	1,0000	0,00	0,00	43,00	3,00
17	1,0000	0,00	0,00	42,00	8,00
18	1,0000	0,00	0,00	27,20	9,80
19	1,0000	0,00	0,00	3,30	0,60
20	1,0000	0,00	0,00	2,30	1,00
21	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,0000	0,00	0,00	6,30	2,10
24	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
25	1,0000	0,00	0,00	6,30	3,20
26	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,0000	0,00	0,00	9,30	0,50
28	1,0000	0,00	0,00	4,60	2,30
29	1,0000	0,00	0,00	17,00	2,60
30	1,0000	0,00	0,00	3,60	1,80
31	1,0000	0,00	0,00	5,80	2,90
32	1,0000	0,00	0,00	1,60	0,80
33	1,0000	0,00	0,00	3,80	1,90
34	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
35	1,0000	0,00	0,00	6,00	3,00

Lanjutan Tabel 4.4. Data tegangan, daya yang dibangkitkan dan beban tiap bus untuk sistem 7 Generator 57 Bus

No.		Power Generated	Beban
-----	--	-----------------	-------

	Tegangan Bus	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
36	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
37	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
38	1,0000	0,00	0,00	14,00	7,00
39	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
40	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
41	1,0000	0,00	0,00	6,30	3,00
42	1,0000	0,00	0,00	7,10	4,40
43	1,0000	0,00	0,00	2,00	1,00
44	1,0000	0,00	0,00	12,00	1,80
45	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
46	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
47	1,0000	0,00	0,00	29,70	11,60
48	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
49	1,0000	0,00	0,00	18,00	8,50
50	1,0000	0,00	0,00	21,00	10,50
51	1,0000	0,00	0,00	18,00	5,30
52	1,0000	0,00	0,00	4,90	2,20
53	1,0000	0,00	0,00	20,00	10,00
54	1,0000	0,00	0,00	4,10	1,40
55	1,0000	0,00	0,00	6,80	3,40
56	1,0000	0,00	0,00	7,60	2,20
57	1,0000	0,00	0,00	6,70	2,00

Dalam *Single Line Diagram* sistem IEEE 7 generator 57 bus diberikan beberapa titik gangguan yang nantinya akan dilakukan perhitungan CCT untuk beberapa kondisi gangguan hubung singkat. Penjelasan mengenai beberapa titik gangguan tersebut adalah sebagai berikut

- Titik A : Gangguan diantara bus 1 dan bus 2, dekat bus 1
- Titik B : Gangguan diantara bus 1 dan bus 15, dekat bus 1
- Titik C : Gangguan diantara bus 2 dan bus 3 dekat bus 2
- Titik D : Gangguan diantara bus 3 dan bus 4, dekat bus 3
- Titik E : Gangguan diantara bus 3 dan bus 15, dekat bus 3
- Titik F : Gangguan diantara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- Titik G : Gangguan diantara bus 6 dan bus 5, dekat bus 6

- Titik H : Gangguan diantara bus 6 dan bus 8, dekat bus 6
- Titik I : Gangguan diantara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
- Titik J : Gangguan diantara bus 8 dan bus 9, dekat bus 8
- Titik K : Gangguan diantara bus 9 dan bus 10, dekat bus 9
- Titik L : Gangguan diantara bus 9 dan bus 55, dekat bus 9
- Titik M : Gangguan diantara bus 11 dan bus 13, dekat bus 11
- Titik N : Gangguan diantara bus 12 dan bus 10, dekat bus 12
- Titik O : Gangguan diantara bus 12 dan bus 13, dekat bus 12
- Titik P : Gangguan diantara bus 14 dan bus 15, dekat bus 14

Proses analisis dan perhitungan CCT secara langsung diperlukan beberapa parameter awal yang nantinya akan digunakan sebagai data dalam perhitungan CCT secara langsung. Dalam perhitungan CCT dilakukan dengan beberapa tahapan seperti yang dijelaskan dalam *flowchart* berikut ini.



Gambar 4.3. Tahapan dalam perhitungan CCT secara langsung

Parameter awal untuk melakukan analisis perhitungan CCT secara langsung adalah penentuan tegangan tiap bus, daya terbangkit dari generator serta tegangan terminal dari generator (E_a) yang ditentukan melalui analisis *Power Flow*. Keseluruhan parameter tersebut untuk sistem 3 Generator 9 Bus serta sistem IEEE 6 generator 30 bus dijelaskan dalam Tabel 4.5 hingga Tabel 4.10. Dalam menentukan *critical trajectory* terdapat nilai inisiasi awal sistem dalam kondisi stabil atau nilai SEP (*Stable Equilibrium Point*). Berikut adalah nilai SEP dalam sistem 3 generator 9 bus dan sistem IEEE 6 generator 30 bus dalam kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) untuk masing-masing generator

Tabel 4.5. Nilai SEP (*Stable Equilibrium Point*) untuk masing-masing generator dalam sistem 3 Generator 9 Bus

<i>Xsep_pre</i>	<i>Stable Equilibrium Point</i>
$\omega_1 (rad)$	0
$\omega_2 (rad)$	0
$\omega_3 (rad)$	0
$\delta_1 (rad/s)$	-0,0764
$\delta_2 (rad/s)$	0,2283
$\delta_3 (rad/s)$	0,1137

Tabel 4.6. Nilai SEP (*Stable Equilibrium Point*) untuk masing-masing generator dalam sistem 6 Generator 30 Bus

<i>Xsep_pre</i>	<i>Stable Equilibrium Point</i>
$\omega_1 (rad)$	0
$\omega_2 (rad)$	0
$\omega_3 (rad)$	0
$\omega_4 (rad)$	0
$\omega_5 (rad)$	0
$\omega_6 (rad)$	0
$\omega_7 (rad)$	0
$\delta_1 (rad/s)$	0,3990
$\delta_2 (rad/s)$	-0,3905
$\delta_3 (rad/s)$	-0,4687

Lanjutan Tabel 4.6. Nilai SEP (*Stable Equilibrium Point*) untuk masing-masing generator dalam sistem 6 Generator 30 Bus

<i>Xsep_pre</i>	<i>Stable Equilibrium Point</i>
δ_4 (rad/s)	-0,6479
δ_5 (rad/s)	0,0056
δ_6 (rad/s)	-0,7536
δ_7 (rad/s)	-0,6404

4.2 Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) Pada Sistem Anderson dan Fouad 3 Generator 9 Bus Tanpa Damping

Melalui *Single Line Diagram* pada Gambar 4.1 dilakukan simulasi perhitungan CCT dengan mengabaikan nilai *damping* pada setiap generator. Dengan menggunakan metode *critical trajectory*. Besar nilai CCT dan *epsilon* pada setiap kondisi gangguan akan bergantung jumlah titik *m*. Dimana titik *m* merupakan titik antara *fault-on-trajectory* sampai dengan *end point* yang didapatkan pada saat kondisi *loss of synchronization* dari generator. Pada simulasi ini diberikan nilai *m* untuk keseluruhan kondisi gangguan sebesar 10.

4.2.1 Perhitungan CCT Untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan satu fasa ketanah dimisalkan terdapat salah satu fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method* atau metode simulasi konvensional. Melalui Tabel 4.7 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode simulasi konvensional. Dari hasil tersebut didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.7. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* gangguan satu fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Perhitungan Langsung	<i>Numerical Simulation Method</i>	<i>Error (%)</i>
--------------------	------------------	-----------------------------	------------------------------------	------------------

		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2187	0,3415	0,21-0,22	203,41	0
B	2-7	0,1966	1,0257	0,20-0,21	210,26	-1,7
C	3-9	0,2186	1,0821	0,21-0,22	210,82	0
D	4-5	0,2247	0,8890	0,22-0,23	208,89	0
E	4-6	0,2245	0,8954	0,22-0,23	208,95	0
F	5-7	0,2107	0,8619	0,21-0,22	208,62	0
G	7-8	0,2147	0,8705	0,21-0,22	208,71	0
H	9-6	0,2126	0,8721	0,21-0,22	208,72	0
I	9-8	0,2203	0,9910	0,22-0,23	209,91	0
RATA -RATA			0,8699		208,69	

Pada metode *numerical simulation method* termasuk dalam jenis perhitungan tidak langsung karena hasil CCT yang didapat masih dalam *range* waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil dan bukan berupa nilai pasti seperti dalam hasil CCT yang didapatkan pada metode perhitungan langsung. Sebagai contoh titik gangguan A memiliki *range* CCT dalam *numerical simulation method* sebesar 0,21 detik sampai 0,22 detik. Nilai 0,21 detik merupakan batas waktu pemutusan stabil dalam sistem, ketika gangguan diputus sebelum waktu tersebut sistem masih dalam kondisi stabil. Sedangkan, untuk nilai waktu 0,22 detik merupakan batas waktu pemutusan tidak stabil, ketika gangguan diputus melebihi batas waktu tersebut sistem berada dalam kondisi tidak stabil. Jadi batas waktu 0.21(s) - 0.22(s) merupakan *clearing time* dari sistem tersebut. Sedangkan untuk metode perhitungan langsung mendapatkan nilai CCT untuk titik gangguan A 0,2187 sekon.

Kemudian jika dibandingkan waktu simulasi dalam metode perhitungan langsung yang ditunjukkan oleh CPU memiliki durasi waktu yang lebih cepat. Waktu dalam simulasi metode perhitungan langsung didapatkan melalui keseluruhan waktu simulasi hingga mendapatkan nilai CCT secara langsung dan tentunya bergantung pada iterasi tiap perhitungan. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* waktu menentukan *range* CCT didapat melalui *trial* dan *error* hingga mendapatkan batas CCT yang sesuai. Dimisalkan untuk mendapatkan batas CCT yang sesuai dibutuhkan percobaan sebanyak 10 kali dengan masing-masing percobaan membutuhkan waktu 20 detik, maka waktu yang dibutuhkan menentukan batas CCT dalam metode *numerical simulation method* adalah sebagai berikut:

$$CPU(s) = 10 \times (20 + \text{waktu simulasi program})$$

Untuk nilai error dalam simulasi didapatkan dengan membandingkan nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung dengan nilai waktu batas stabil atau *tcs* dan nilai waktu batas tidak stabil atau *tcu* menggunakan perhitungan berikut:

$$\text{error} = \frac{\text{CCT perhitungan langsung} - \text{tcu atau tcs}}{\text{tcu atau tcs}} \times 100 \%$$

Dimana batas bawah atau nilai *tcu* digunakan ketika nilai CCT kurang dari batas *tcu*. Sedangkan batas atas atau nilai *tcs* digunakan ketika nilai CCT melebihi batas *tcs*.

Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan satu fasa ke tanah didapatkan nilai *error* sebesar 0% kecuali pada titik gangguan B. Pada titik gangguan B terdapat *error* sebesar -1,7% karena untuk titik gangguan B melalui simulasi konvensional didapatkan batas CCT Antara 0,20(s)-0,21(s) sedangkan melalui perhitungan langsung didapatkan nilai CCT 0,1966 (s). Jadi, nilai CCT pada titik gangguan B memiliki nilai dibawah batas waktu stabil, dan sistem masih berada dalam kondisi stabil pada waktu pemutusan tersebut.

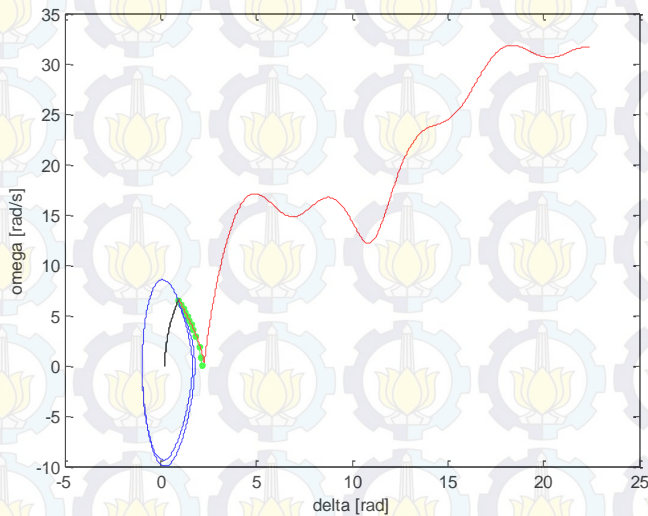
4.2.1.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.7 akan diberikan hasil plotting grafik berdasarkan simulasi yang telah dijalankan, dengan sampel titik gangguan A dan D. Grafik yang dihasilkan berupa grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil. Grafik yang dihasilkan diwakili oleh *critical generator* yang ada dalam sistem 3 generator 9 bus. Analisis karakteristik grafik dalam kondisi stabil dimana gangguan yang terjadi diputus sebelum nilai batas bawah atau berada dalam rentang CCT yang didapat melalui metode *numerical simulation method* diwakili oleh kurva berwarna “biru” yang mewakili kondisi stabil jika gangguan diputus sebelum CCT sedangkan untuk kurva berwarna “merah” mewakili kondisi sistem tidak stabil karena pemutusan gangguan melebihi nilai batas atas CCT yang didapat dari *numerical simulation method*. Sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan *critical trajectory* hasil dari simulasi sehingga didapatkan nilai CCT secara langsung. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik dari titik gangguan A

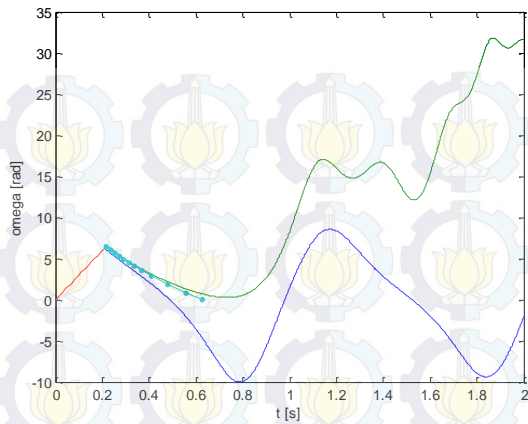
dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dalam sistem 3 Generator 9 Bus tanpa *damping*.

- Titik Gangguan A

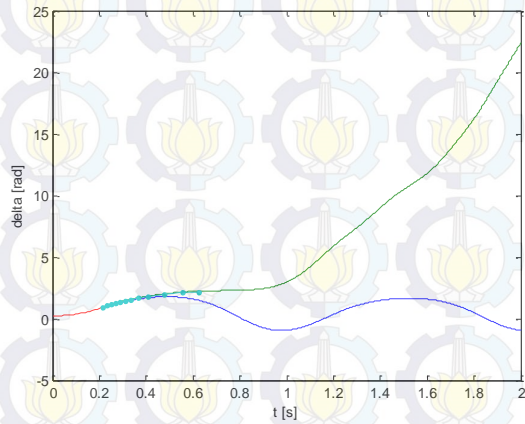
Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2187 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,21 detik hingga 0,22 detik.



Gambar 4.4. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah



(a)

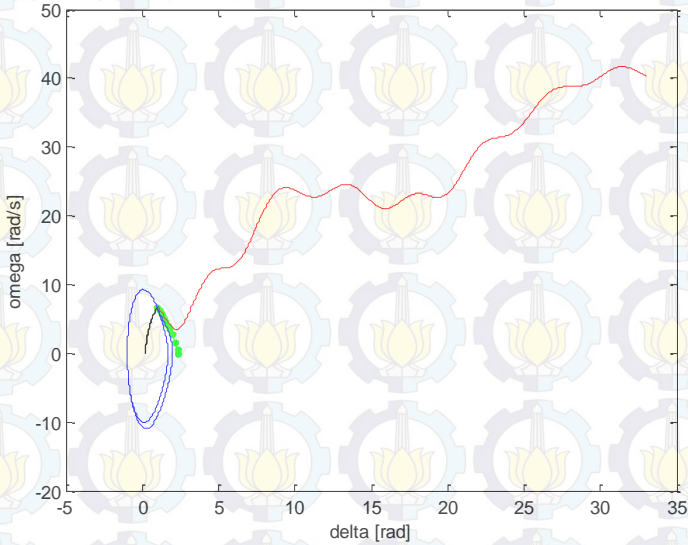


(b)

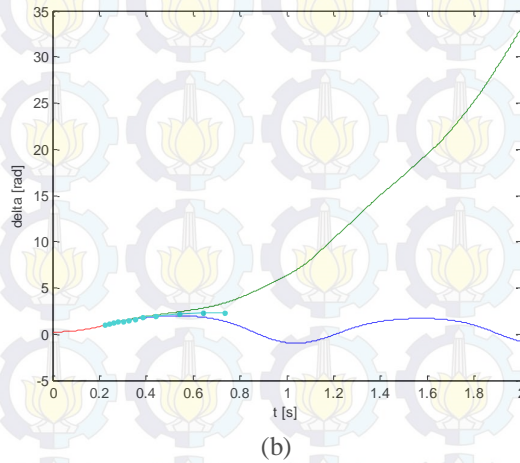
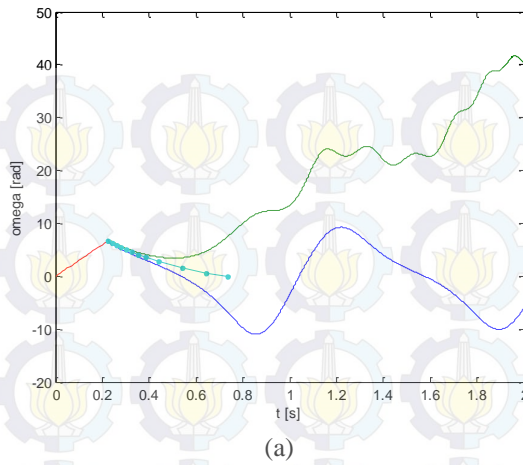
Gambar 4.5. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

- Titik Gangguan D

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2247 detik. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,22 detik hingga 0,23 detik.



Gambar 4.6. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah



Gambar 4.7. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

4.2.2 Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan dua fasa ketanah dimisalkan terdapat dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Untuk simulasi perhitungan kali ini dimisalkan fasa pertama dan fasa kedua terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Dari gangguan tersebut kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.8 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.8. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* gangguan dua fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2177	0,8584	0,21-0,22	203,41	0
B	2-7	0,1967	1,4952	0,20-0,21	210,26	-1,6
C	3-9	0,2184	0,8703	0,21-0,22	210,82	0
D	4-5	0,2244	0,9951	0,22-0,23	208,89	0
E	4-6	0,2244	0,8740	0,22-0,23	208,95	0
F	5-7	0,2094	0,8687	0,20-0,21	208,62	0
G	7-8	0,2146	0,8848	0,21-0,22	208,71	0
H	9-6	0,2123	0,9424	0,21-0,22	208,72	0
I	9-8	0,2162	0,9601	0,22-0,23	209,91	0
RATA –RATA			0,9610		209,61	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Dari hasil Tabel diatas masih didapatkan *error* untuk titik gangguan B -1,6%. Nilai CCT pada titik gangguan B sebesar 0,1967(s) yang didapatkan melalui metode perhitungan langsung memiliki nilai lebih yang lebih kecil jika dibandingkan dengan batas CCT yang didapatkan

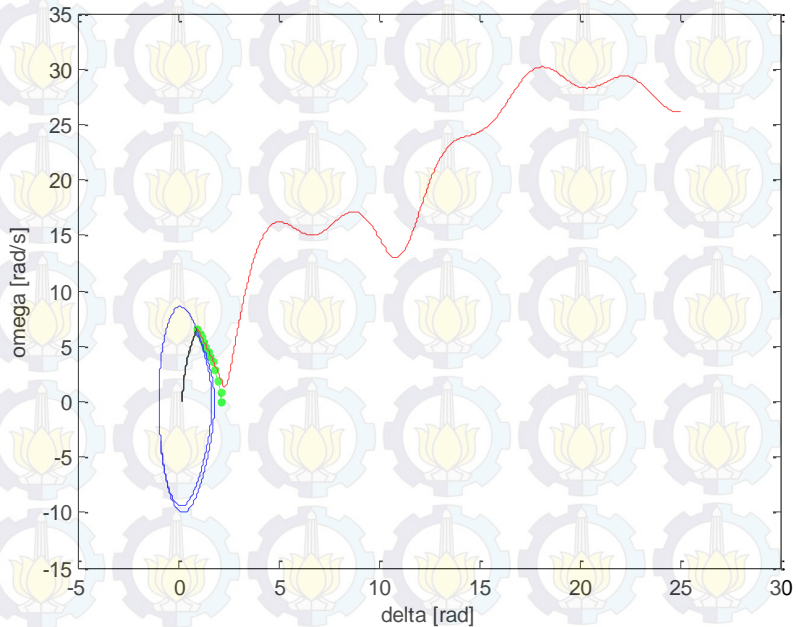
melalui metode konvensional dengan nilai batas 0,20(s)-0,21(s). Artinya, CCT yang didapat melalui perhitungan langsung akan memutus gangguan lebih cepat jika dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*, dan sistem masih dalam kondisi stabil dalam batas waktu tersebut.

4.2.2.1 Analisis grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah

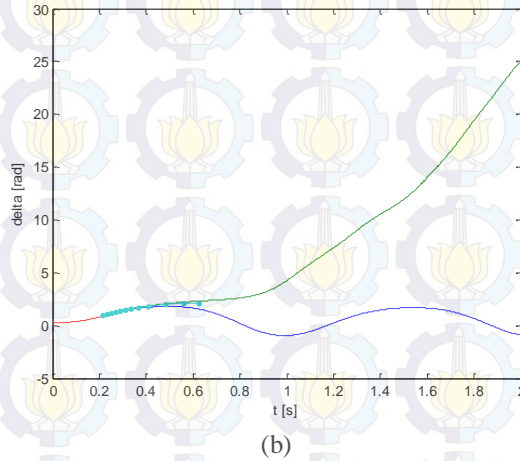
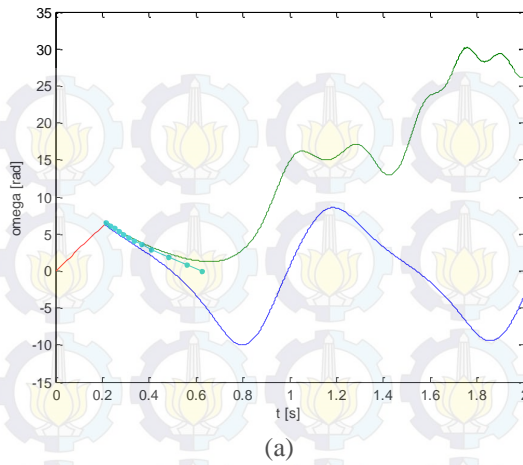
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa, untuk jenis gangguan dua fasa ke tanah juga akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ), kecepatan sudut (ω) terhadap waktu serta sudut rotor (δ) terhadap waktu dalam kondisi stabil dan tidak stabil dengan sampel titik gangguan A dan D yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.8 hingga Gambar 4.11. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik dari titik gangguan A dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dalam sistem 3 Generator 9 Bus tanpa *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,2187 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,21 detik hingga 0,22 detik.



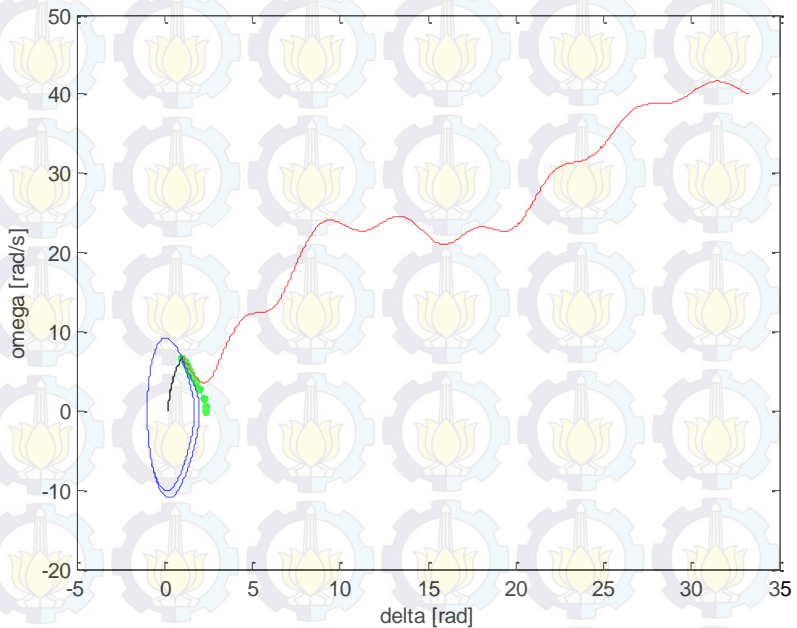
Gambar 4.8. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah



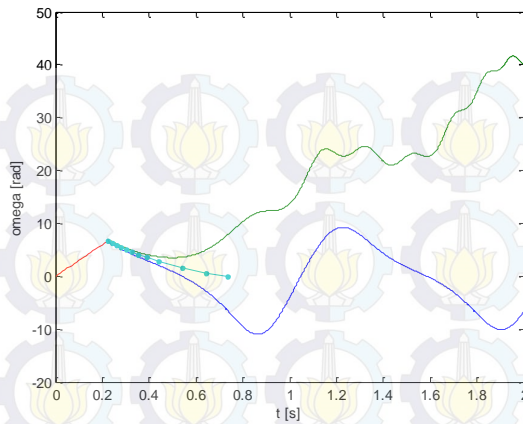
Gambar 4.9. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

- Titik Gangguan D

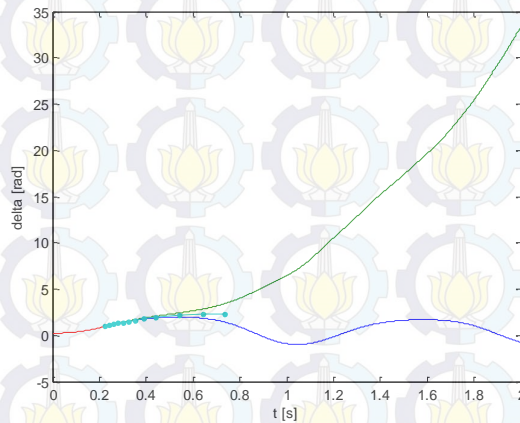
Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,2244 detik yang ditunjukkan dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,22 detik hingga 0,23 detik.



Gambar 4.10. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah



(a)



(b)

Gambar 4.11. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah .

4.2.3 Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa

Simulasi perhitungan CCT gangguan antar fasa dimisalkan terdapat dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat, dimisalkan fasa pertama dan kedua, dan kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.9 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.9. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa damping gangguan antar fasa

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2186	0,8677	0,21-0,22	208,67	0
B	2-7	0,1976	1,1760	0,20-0,21	211,76	-1,2
C	3-9	0,2189	0,4693	0,21-0,22	204,69	0
D	4-5	0,2247	0,8996	0,22-0,23	208,99	0
E	4-6	0,2245	0,8726	0,22-0,23	208,7	0
F	5-7	0,2107	0,9049	0,21-0,22	209,05	0
G	7-8	0,2147	0,8846	0,21-0,22	208,85	0
H	9-6	0,2127	0,9422	0,21-0,22	209,42	0
I	9-8	0,2203	0,8699	0,22-0,23	208,67	0
RATA -RATA			0,8763		208,76	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* untuk gangguan hubung singkat antar fasa menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Untuk jenis gangguan hubung singkat antar fasa, CCT hasil perhitungan masih terdapat *error* untuk titik gangguan B -1,2% dengan nilai CCT yang lebih kecil dari batas bawah CCT untuk metode *numerical simulation method*, yakni untuk nilai perhitungan langsung didapatkan

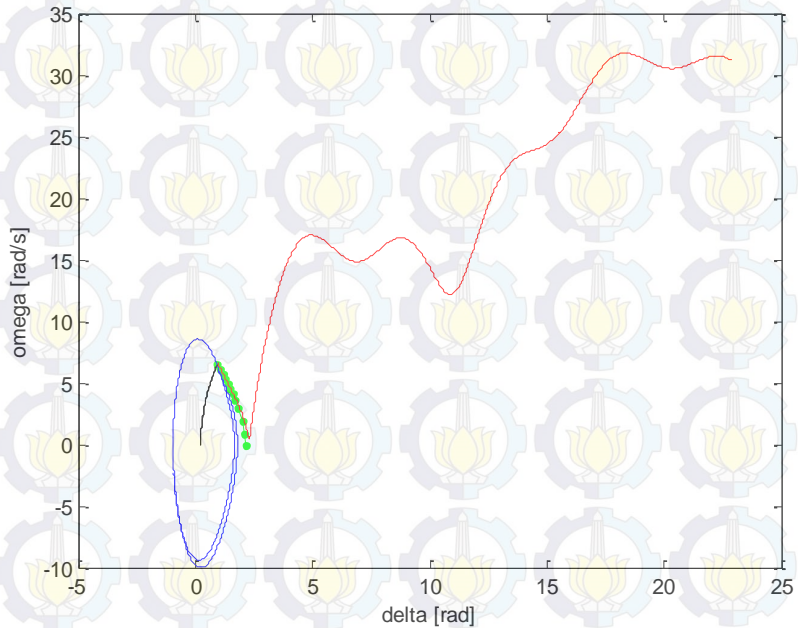
waktu pemutusan 0,1976(s) dan *range* CCT yang didapatkan berada pada 0,20(s)-0,21(s). Hal ini berarti pemutusan gangguan akan lebih cepat jika dibandingkan menggunakan CCT metode *numerical simulation method* dan sistem masih dalam kondisi stabil.

4.2.3.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa

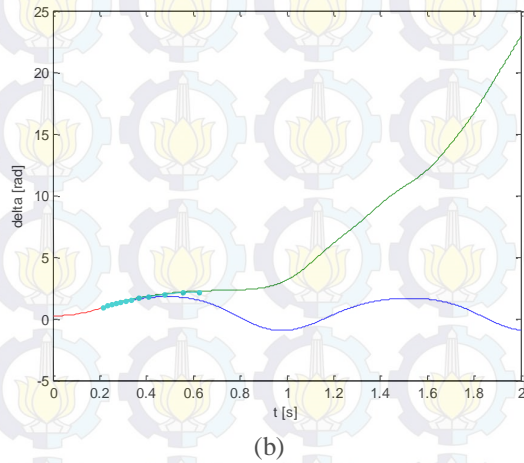
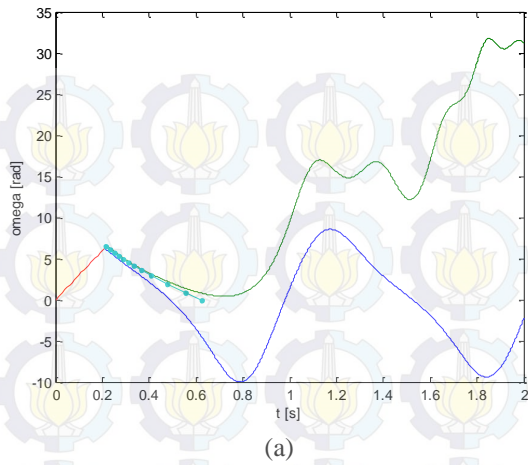
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan sebelumnya, untuk jenis gangguan antar fasa akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ), kecepatan sudut (ω) terhadap waktu serta sudut rotor (δ) terhadap waktu dalam kondisi stabil dan tidak stabil dengan sampel titik gangguan A dan D yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.12 sampai Gambar 4.15. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik dari titik gangguan A dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat antar fasa dalam sistem 3 Generator 9 Bus tanpa *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,2186 detik yang ditunjukkan dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,21 detik hingga 0,22 detik.



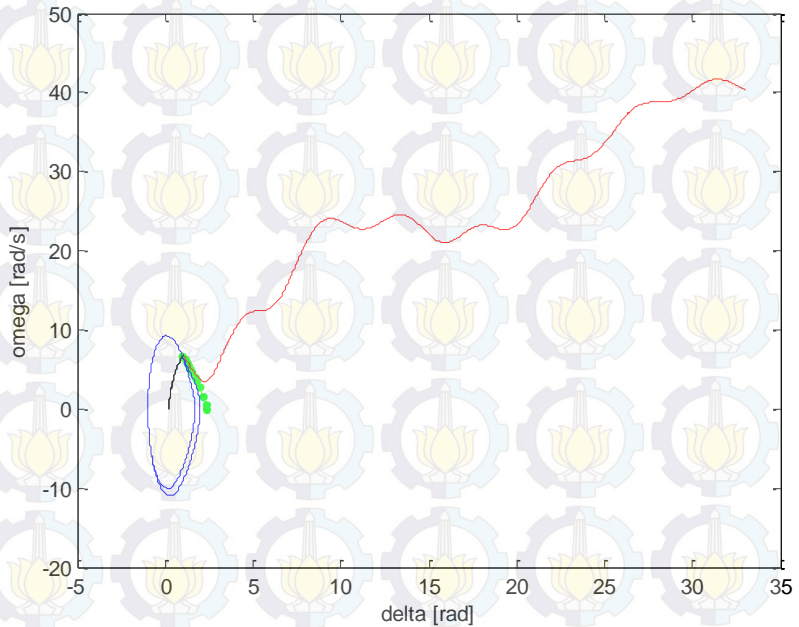
Gambar 4.12. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat antar fasa.



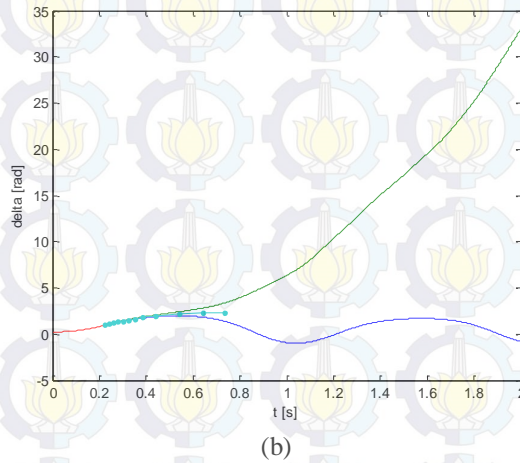
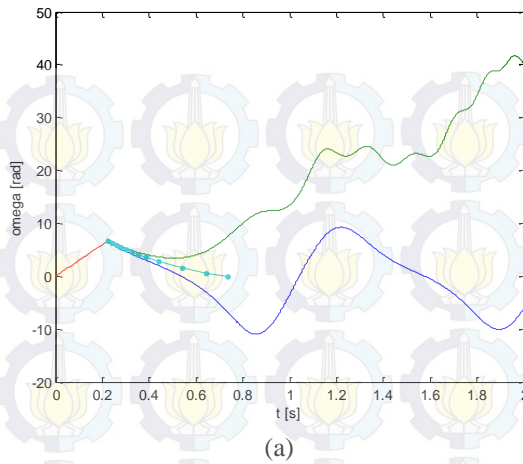
Gambar 4.13. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat antar fasa.

- Titik Gangguan D

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,2247 detik yang ditunjukkan dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,22 detik hingga 0,23 detik.



Gambar 4.14. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat antar fasa.



Gambar 4.15. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat antar fasa.

4.2.4 Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke Tanah

Jenis gangguan tiga fasa merupakan jenis gangguan simetri. Simulasi perhitungan CCT dimisalkan terdapat saluran transmisi yang terhubung singkat pada ketiga fasanya. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.10 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.10. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* gangguan tiga fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2180	0,8518	0,21-0,22	208,51	0
B	2-7	0,2088	1,1668	0,21-0,22	211,66	-0,6
C	3-9	0,2270	1,0101	0,21-0,22	210,10	0
D	4-5	0,2246	0,9370	0,22-0,23	209,37	0
E	4-6	0,2245	0,8920	0,22-0,23	208,92	0
F	5-7	0,2108	0,8620	0,21-0,22	208,62	0
G	7-8	0,2149	0,8760	0,21-0,22	208,76	0
H	9-6	0,2127	0,7370	0,21-0,22	207,37	0
I	9-8	0,2204	0,9016	0,22-0,23	209,01	0
RATA -RATA			0,9149		209,15	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Sama dengan jenis gangguan sebelumnya, untuk CCT hasil perhitungan langsung jenis gangguan tiga fasa ke tanah masih terdapat *error* untuk titik gangguan B sebesar -0,6% dengan nilai waktu pemutusan pada 0,2088(s) dengan nilai CCT yang perhitungan langsung lebih kecil dari batas bawah CCT yang berada pada *range* 0,21(s)-0,22(s) untuk metode *numerical simulation method*. Hal ini berarti pemutusan

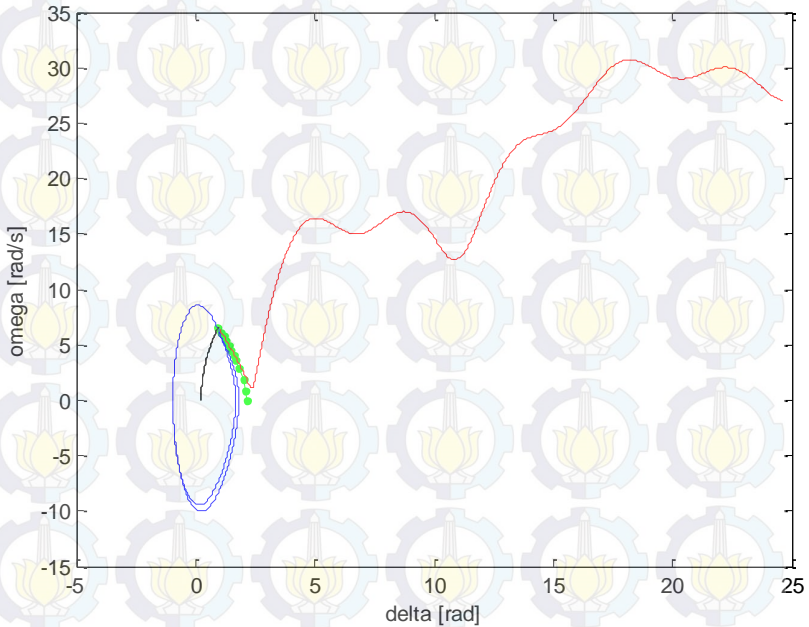
gangguan akan lebih cepat jika dibandingkan menggunakan CCT metode *numerical simulation method* dan sistem masih dalam kondisi stabil.

4.2.4.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah

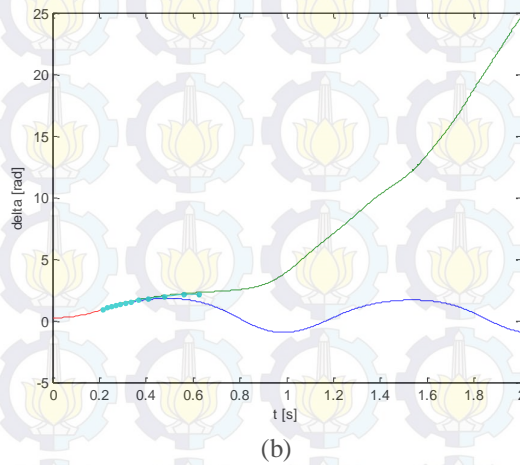
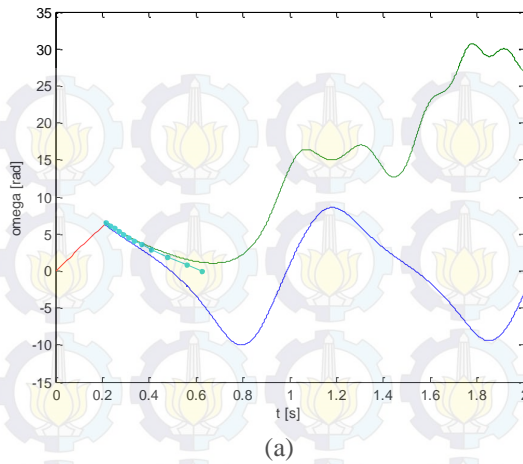
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan sebelumnya, untuk jenis gangguan tiga fasa ke tanah akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil dengan sampel titik gangguan A dan titik gangguan D yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.16 hingga Gambar 4.19. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik dari titik gangguan A dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah dalam sistem 3 Generator 9 Bus tanpa *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,2180 detik yang ditunjukkan dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,21 detik hingga 0,22 detik.



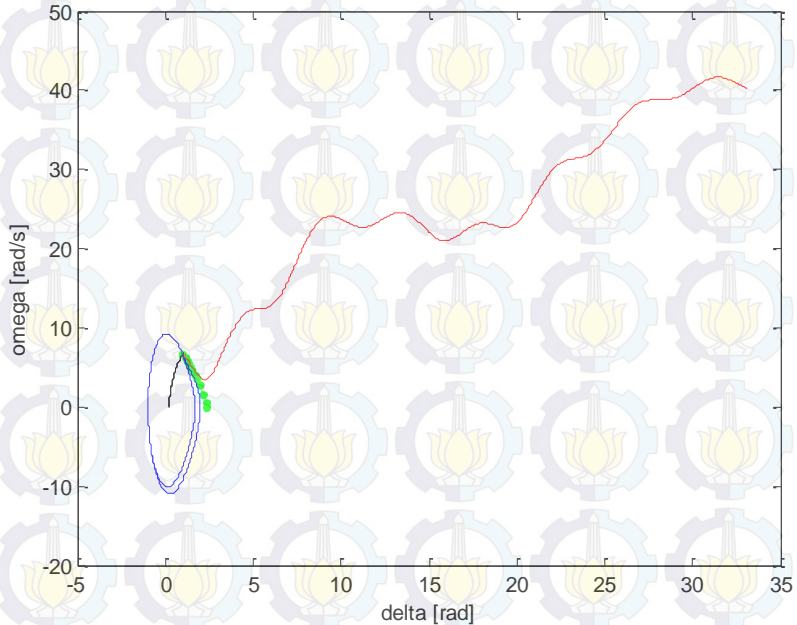
Gambar 4.16. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



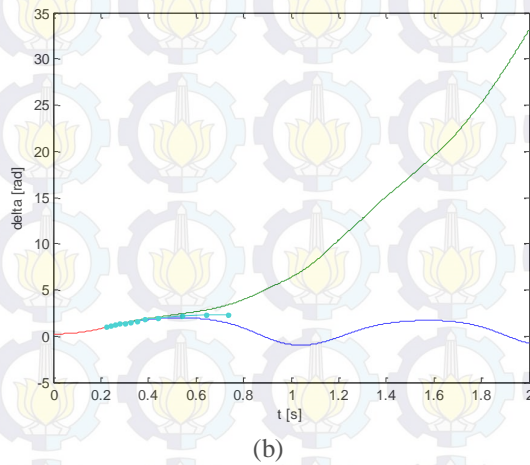
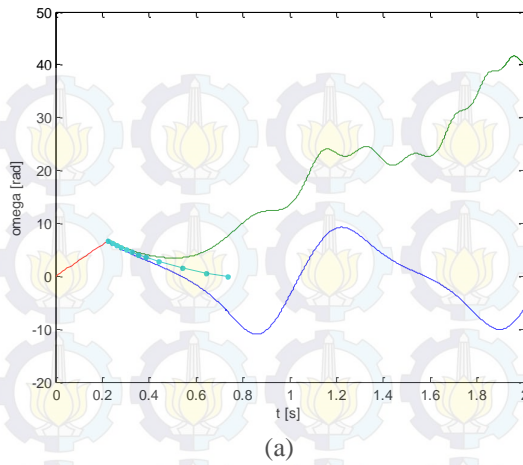
Gambar 4.17. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

- Titik Gangguan D

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,2246 detik yang ditunjukkan dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,22 detik hingga 0,23 detik.



Gambar 4.18. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



Gambar 4.19. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

4.3 Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) pada Sistem Anderson dan Fouad 3 Generator 9 Bus Menggunakan *Damping*

Melalui *Single Line Diagram* pada Gambar 4.1 dilakukan simulasi perhitungan CCT dengan memasukkan nilai *damping* pada setiap generator sebesar 5%. Dengan menggunakan metode *critical trajectory* besar nilai CCT dan epsilon pada setiap kondisi gangguan akan bergantung nilai *m*. Dimana nilai *m* merupakan jumlah titik antara *fault-on-trajectory* sampai dengan *end point* yang didapatkan melalui kondisi *loss of synchronization* dari generator. Pada simulasi ini diberikan nilai *m* untuk keseluruhan kondisi gangguan sebesar 10.

4.3.1 Perhitungan CCT untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan satu fasa ketanah dimisalkan terdapat salah satu fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method* atau metode simulasi konvensional. Melalui Tabel 4.11 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati antara kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.11. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* gangguan satu fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Perhitungan Langsung		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2543	0,2646	0,25-0,26	208,51	0
B	2-7	0,2421	1,1668	0,21-0,22	211,66	0
C	3-9	0,2542	0,7270	0,25-0,26	210,10	0
D	4-5	0,2611	0,3126	0,26-0,27	209,37	0
E	4-6	0,2604	0,3985	0,26-0,27	208,92	0
F	5-7	0,2438	0,2460	0,24-0,25	208,62	0
G	7-8	0,2540	0,3473	0,25-0,26	208,76	0

Lanjutan Tabel 4.12. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* gangguan satu fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Perhitungan Langsung		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
H	9-6	0,2478	0,2852	0,24-0,25	207,37	0
I	9-8	0,2574	0,2808	0,25-0,26	209,01	0
RATA -RATA			0,9149		209,15	

Berdasar hasil simulasi diatas terdapat dua metode perhitungan yang akan dibandingkan. Untuk metode *numerical simulation method* merupakan metode perhitungan secara tak langsung dikarenakan nilai CCT yang dihasilkan masih berupa batas atas dan batas bawah, dimana batas bawah merupakan batas waktu pemutusan stabil sedangkan batas atas dari nilai tersebut merupakan batas maksimal pemutusan gangguan agar sistem tetap stabil. Dimisalkan untuk titik gangguan A berdasarkan metode *numerical simulation method* menghasilkan batas CCT 0,25-0,26 detik, hal ini berarti jika gangguan diputus diantara batas bawah nilai tersebut atau dalam waktu 0,25(s) sistem masih dalam batas stabil, sedangkan jika gangguan diputus dalam waktu lebih dari 0.26 detik maka sistem akan mengalami ketidakstabilan. Untuk metode yang diusulkan yakni metode perhitungan langsung, yakni nilai CCT yang didapat berupa nilai langsung bukan berupa batas nilai untuk titik gangguan A didapatkan nilai waktu pemutusan sebesar 0,2543 detik.

Untuk waktu simulasi (CPU) metode perhitungan langsung didasarkan pada waktu simulasi program sampai didapatkan nilai CCT secara langsung. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* menggunakan sistem *trial and error* untuk mendapatkan nilai batas pemutusan. Dimisalkan untuk sistem gangguan ini terdapat 20 kali percobaan hingga menemukan batas waktu tersebut. Sehingga persamaan untuk mendapatkan waktu simulasi (CPU) metode *numerical simulation method* adalah sebagai berikut

$$CPU(s) = 10 \times (20 + \text{waktu simulasi program})$$

Dari hasil simulasi diatas masih terdapat error untuk kedua metode. Error dilihat berdasarkan nilai CCT secara langsung dibandingkan dengan nilai batas bawah atau *time clearing stable* (tcs) dan batas atas atau *time clearing unstable* (tcs). Untuk perhitungan error kedua metode tersebut melalui persamaan berikut

$$error = \frac{CCT \text{ perhitungan langsung} - tcu \text{ atau } tcs}{tcu \text{ atau } tcs} \times 100 \%$$

Dimana batas bawah atau nilai *tcu* digunakan ketika nilai CCT kurang dari batas *tcu*. Sedangkan batas atas atau nilai *tcs* digunakan ketika nilai CCT melebihi batas *tcs*.

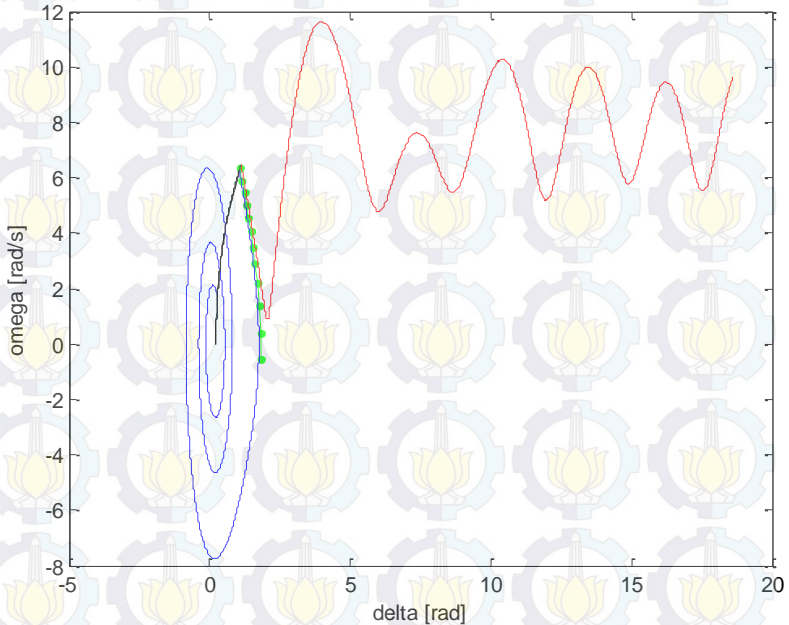
Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan satu fasa ke tanah dengan *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan I. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

4.3.1.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah

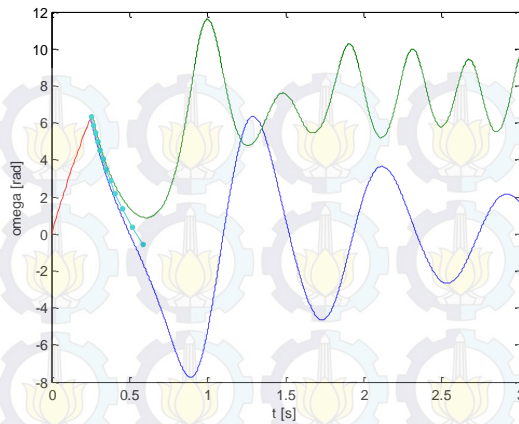
Pada Gambar 4.20 hingga Gambar 4.23 akan diberikan hasil plotting grafik berdasarkan simulasi yang telah dijalankan, dengan sampel titik gangguan A dan D Grafik yang dihasilkan berupa grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil. Grafik yang dihasilkan diwakili oleh *critical generator* yang ada dalam sistem 3 generator 9 bus dengan menggunakan *damping*. Analisis karakteristik grafik dalam kondisi stabil dimana gangguan yang terjadi diputus sebelum nilai batas bawah atau berada dalam rentang CCT yang didapat melalui metode *numerical simulation method* diwakili oleh kurva berwarna “biru” sedangkan untuk kurva berwarna “merah” mewakili kondisi sistem tidak stabil karena pemutusan gangguan melebihi nilai batas atas CCT yang didapat dari *numerical simulation method*. Sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan *critical trajectory* hasil dari simulasi sehingga didapatkan nilai CCT secara langsung. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dalam sistem 3 Generator 9 Bus menggunakan *damping*.

- Titik Gangguan A

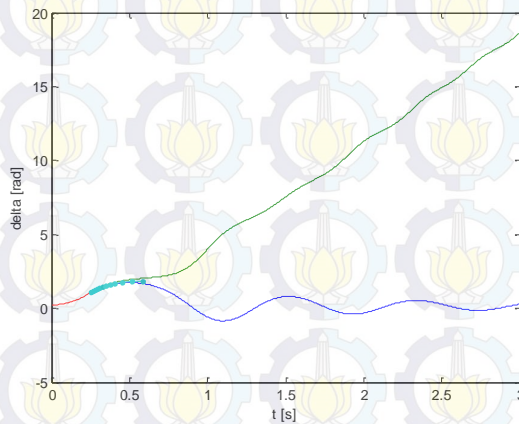
Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2543 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,25 detik hingga 0,26 detik.



Gambar 4.20. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.



(a)

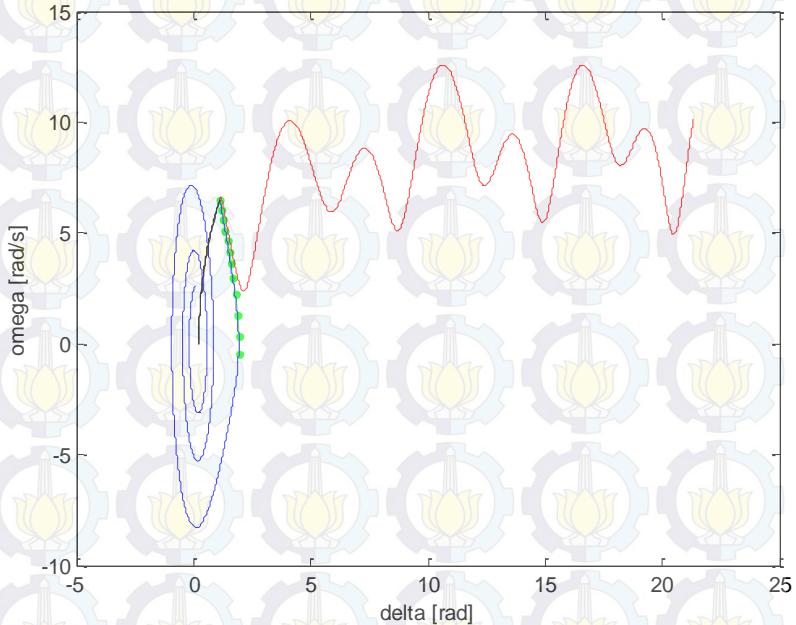


(b)

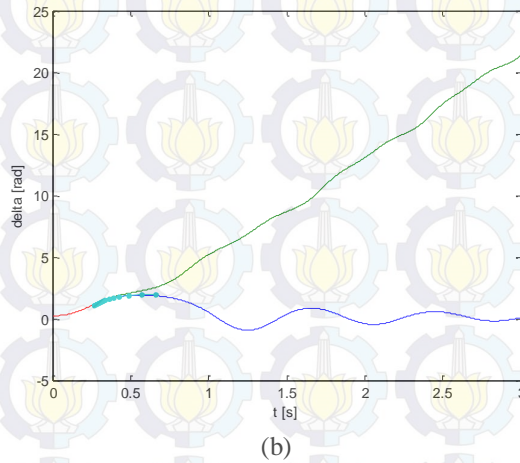
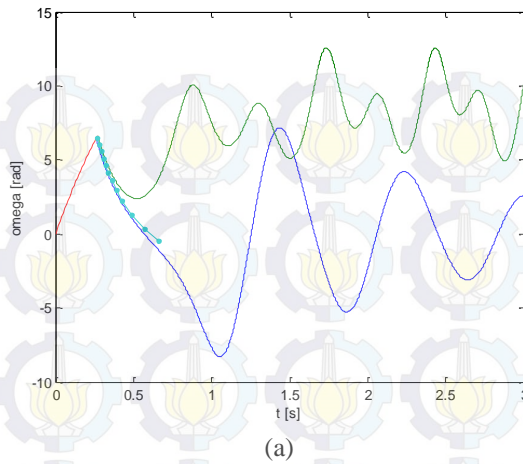
Gambar 4.21. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

- Titik Gangguan D

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2611 detik. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,26 detik hingga 0,27 detik.



Gambar 4.22. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.



Gambar 4.23. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

4.3.2 Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan satu fasa ketanah dimisalkan terdapat dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Untuk simulasi kali ini dimisalkan fasa pertama dan kedua terjadi gangguan hubung singkat yang kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.12 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.12. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* gangguan dua fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Perhitungan Langsung		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2533	0,2692	0,25-0,26	208,51	0
B	2-7	0,2422	1,1668	0,24-0,25	211,66	0
C	3-9	0,2537	0,2674	0,25-0,26	210,10	0
D	4-5	0,2608	0,3155	0,26-0,27	209,37	0
E	4-6	0,2603	0,3348	0,26-0,27	208,92	0
F	5-7	0,2436	0,3488	0,24-0,25	208,62	0
G	7-8	0,2539	0,3493	0,25-0,26	208,76	0
H	9-6	0,2474	0,2808	0,24-0,25	207,37	0
I	9-8	0,2571	0,2813	0,25-0,26	209,01	0
RATA -RATA			0,9149		209,15	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Dari keseluruhan hasil simulasi yang ditampilkan oleh Tabel 4.12 didapatkan untuk jenis gangguan dua fasa ke tanah dengan *damping* nilai *error* yang diperoleh sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan I. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai

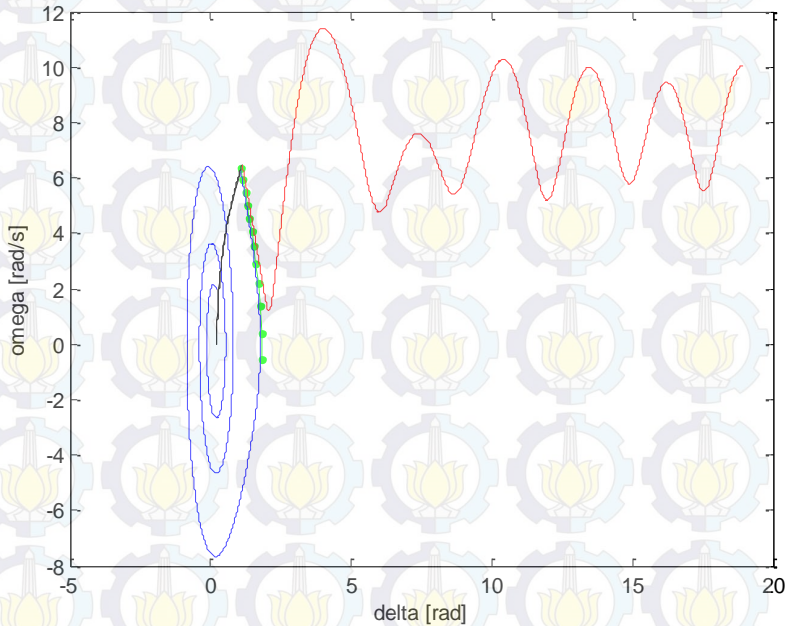
batas atas dan batas bawah yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

4.3.2.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah

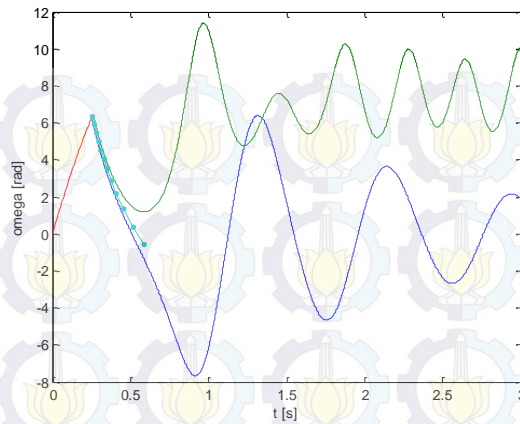
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa ke tanah, untuk jenis gangguan dua fasa ke tanah akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil, grafik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (t) serta grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (t) dengan sampel titik gangguan A dan D yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.24 hingga Gambar 4.27. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik dari titik gangguan A dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dalam sistem 3 Generator 9 Bus menggunakan *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

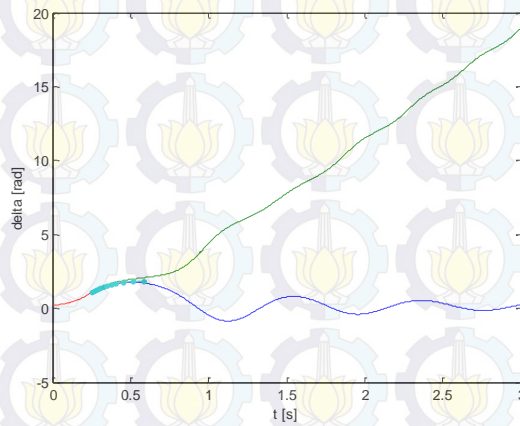
Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2533 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,25 detik hingga 0,26 detik.



Gambar 4.24. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.



(a)

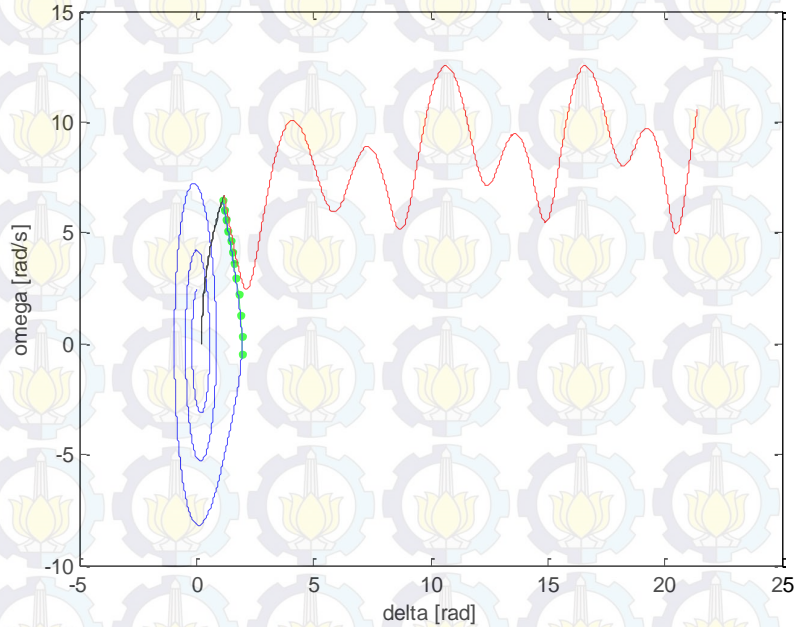


(b)

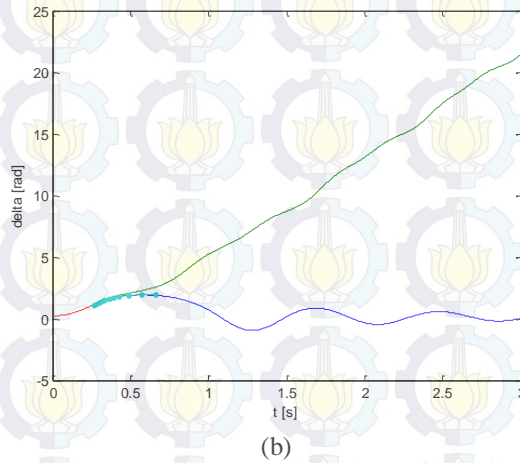
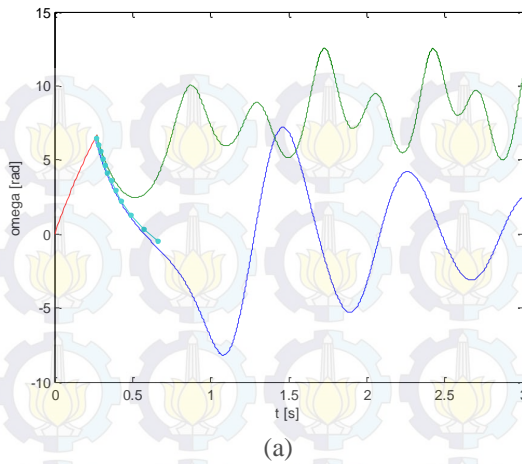
Gambar 4.25. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

- Titik Gangguan D

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2608 detik. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,26 detik hingga 0,27 detik.



Gambar 4.26. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.



Gambar 4.27. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

4.3.3 Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa

Simulasi perhitungan CCT gangguan satu fasa ketanah dimisalkan terdapat salah dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.13 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.13. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* gangguan antar fasa.

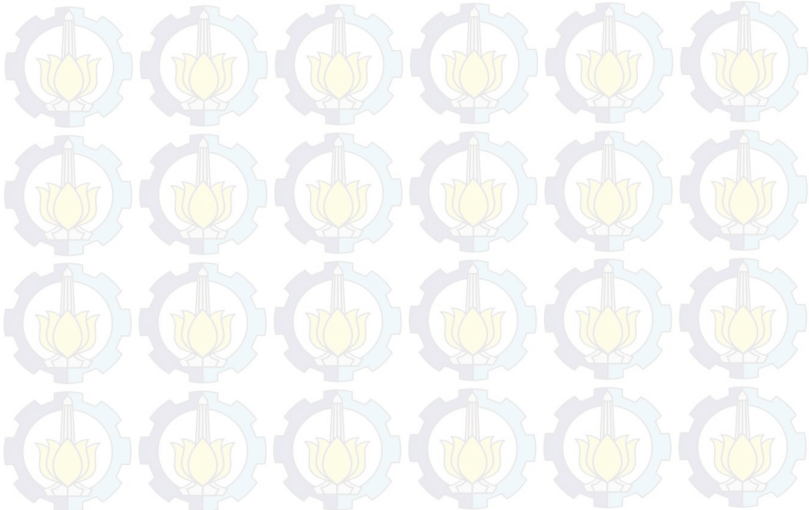
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Perhitungan Langsung		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2542	0,2904	0,25-0,26	208,51	0
B	2-7	0,2425	1,1668	0,21-0,22	211,66	0
C	3-9	0,2544	0,2743	0,25-0,26	210,10	0
D	4-5	0,2611	0,3102	0,26-0,27	209,37	0
E	4-6	0,2604	0,3262	0,26-0,27	208,92	0
F	5-7	0,2438	0,3522	0,24-0,25	208,62	0
G	7-8	0,2540	0,4203	0,25-0,26	208,76	0
H	9-6	0,2478	0,2880	0,24-0,25	207,37	0
I	9-8	0,2574	0,2827	0,25-0,26	209,01	0
RATA -RATA			0,9149		209,15	

Sama dengan jenis gangguan sebelumnya, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Untuk perhitungan CPU pada metode simulasi konvensional disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan antar fasa diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Dari keseluruhan hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.13 untuk gangguan antar fasa dengan *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan I. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

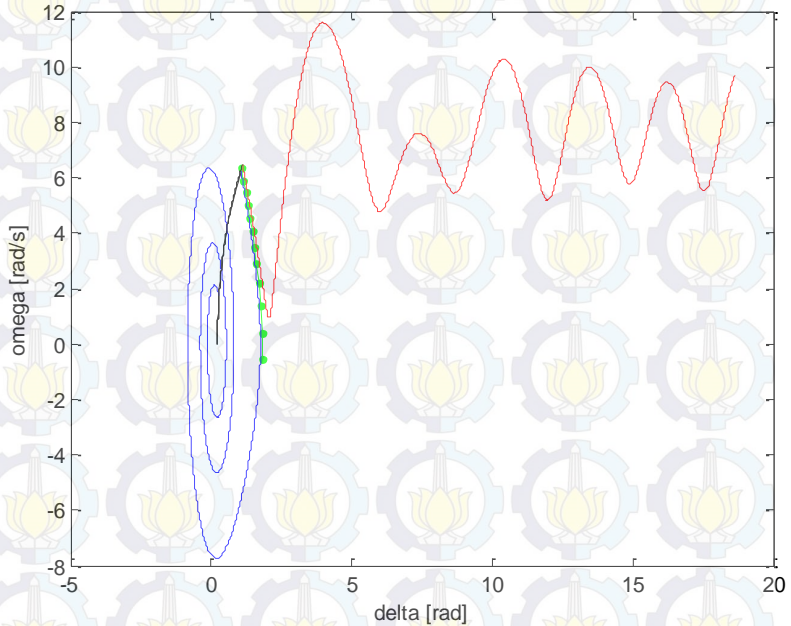
4.3.3.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa

Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa ke tanah, untuk jenis gangguan dua fasa ke tanah akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil, grafik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (t) serta grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (t) dengan sampel titik gangguan A dan D yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.27 hingga Gambar 4.30. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dalam sistem 3 Generator 9 Bus menggunakan *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

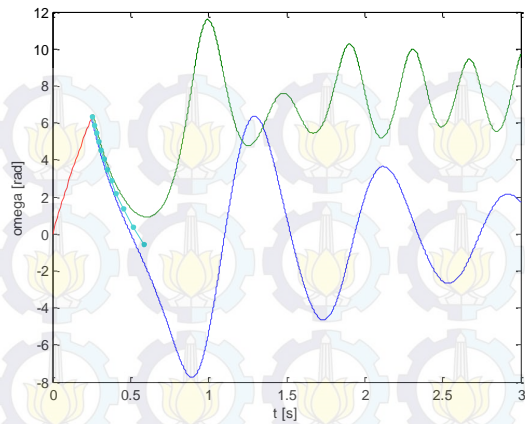


- Titik Gangguan A

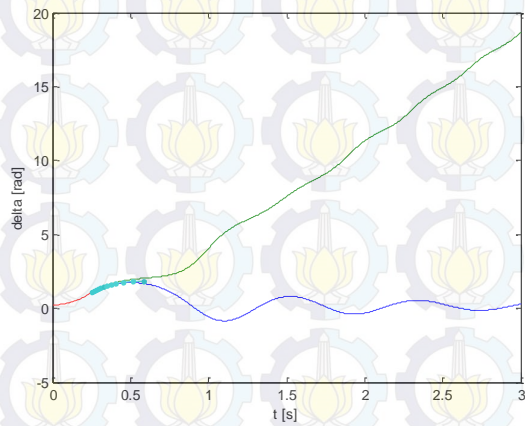
Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0.2542 detik. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,25 detik hingga 0,26 detik.



Gambar 4.28. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat antar fasa.



(a)

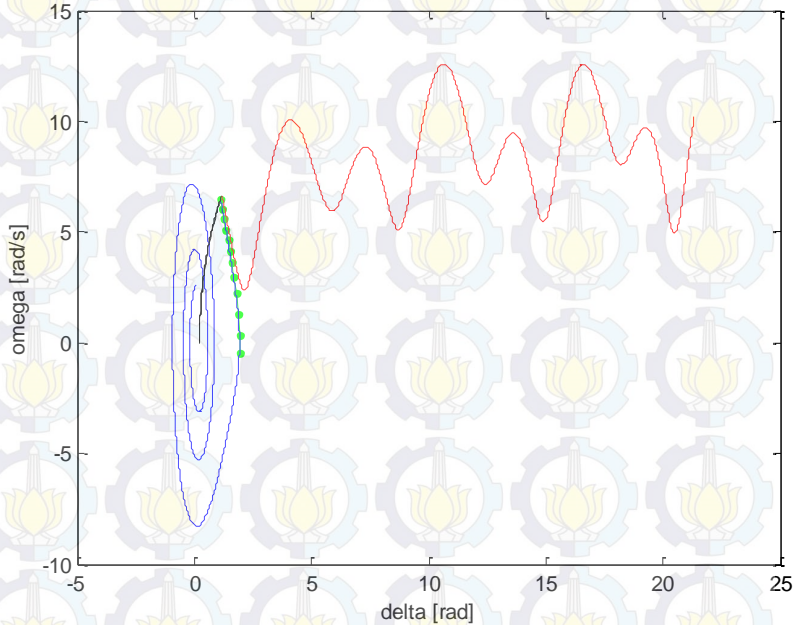


(b)

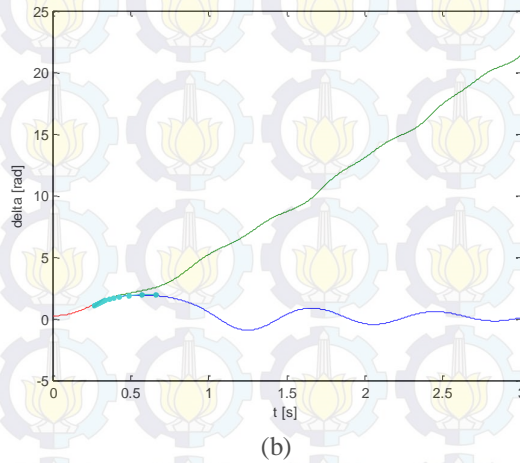
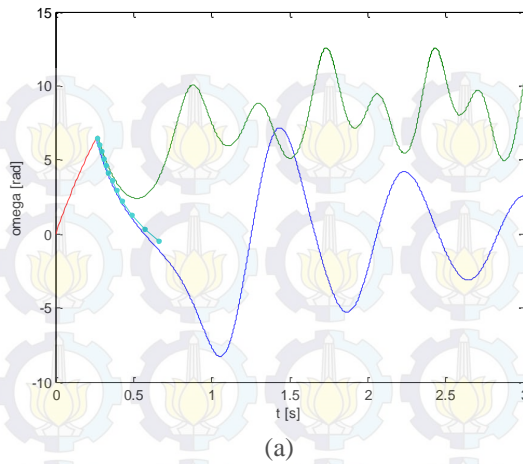
Gambar 4.29. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat antar fasa.

- Titik Gangguan D

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2611 detik. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,26 detik hingga 0,27 detik.



Gambar 4.30. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat antar fasa.



Gambar 4.31. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat antar fasa.

4.3.4 Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke tanah

Jenis gangguan tiga fasa merupakan jenis gangguan simetri. Simulasi perhitungan CCT dimisalkan terdapat saluran transmisi yang terhubung singkat pada ketiga fasanya. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.14 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.14. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* gangguan tiga fasa ke tanah

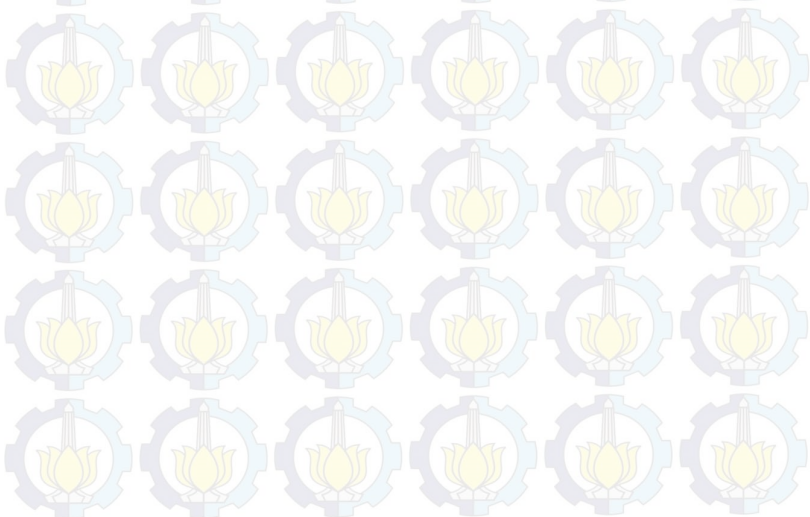
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Perhitungan Langsung		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2535	0,2919	0,25-0,26	208,51	0
B	2-7	0,2428	1,1668	0,24-0,25	211,66	0
C	3-9	0,2581	0,2878	0,25-0,26	210,10	0
D	4-5	0,2610	0,3155	0,26-0,27	209,37	0
E	4-6	0,2605	0,2963	0,26-0,27	208,92	0
F	5-7	0,2439	0,2712	0,24-0,25	208,62	0
G	7-8	0,2542	0,3419	0,25-0,26	208,76	0
H	9-6	0,2479	0,2819	0,24-0,25	207,37	0
I	9-8	0,2575	0,2826	0,25-0,26	209,01	0
RATA -RATA			0,9149		209,15	

Sama dengan jenis gangguan sebelumnya, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Untuk perhitungan CPU pada metode simulasi konvensional disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan tiga fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Dari keseluruhan hasil simulasi yang ditampilkan pada Tabel 4.14 untuk gangguan tiga fasa ke tanah dengan *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan I. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

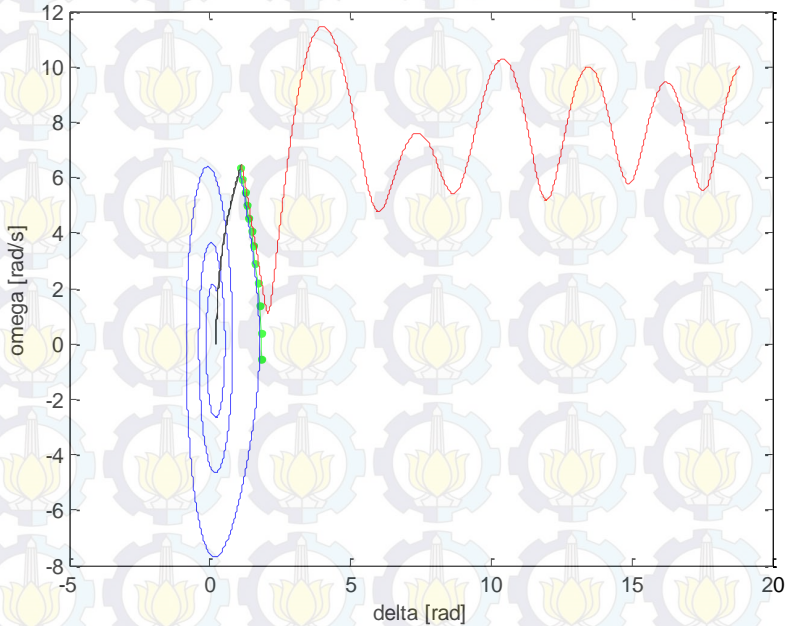
4.3.4.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah

Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa ke tanah, untuk jenis gangguan dua fasa ke tanah akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil, grafik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (t) serta grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (t) dengan sampel titik gangguan A dan D yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.32 hingga Gambar 4.35. Berikut ini diberikan hasil analisis sampel grafik dari titik gangguan A dan titik gangguan D untuk jenis gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah dalam sistem 3 Generator 9 Bus menggunakan *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

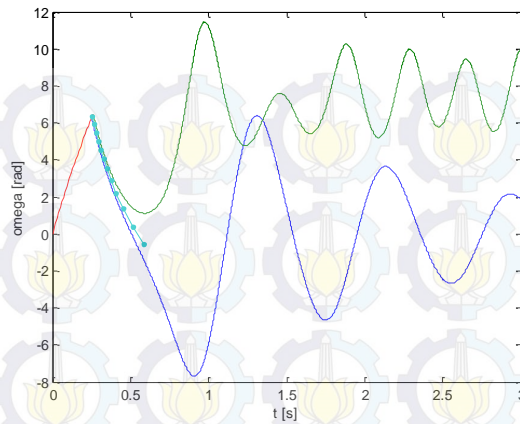


- Titik Gangguan A

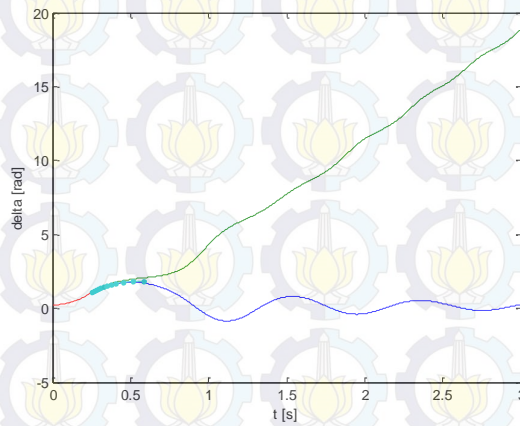
Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2535 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,25 detik hingga 0,26 detik.



Gambar 4.32. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah



(a)

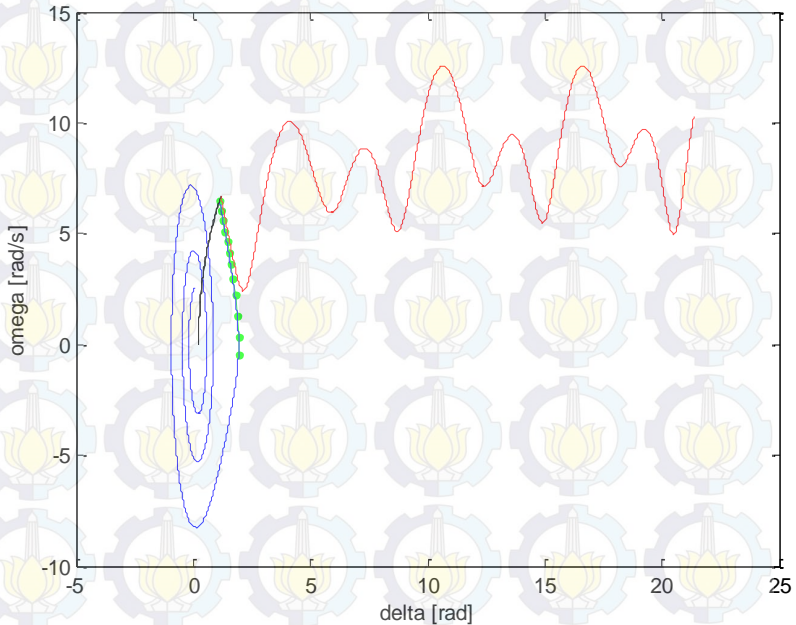


(b)

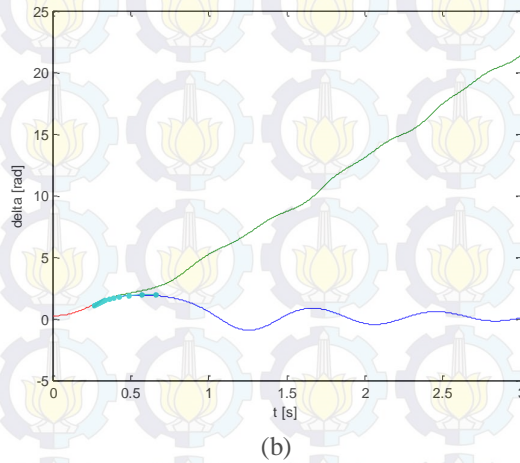
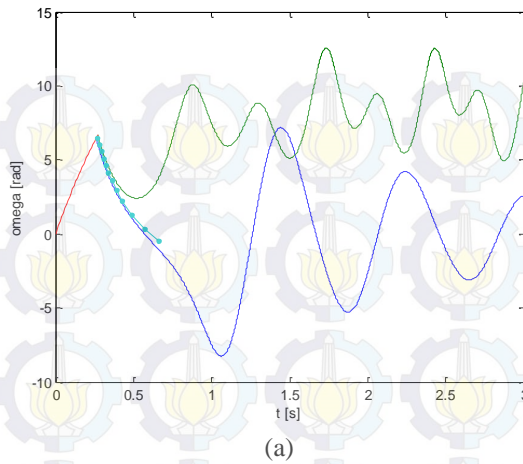
Gambar 4.33. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah

- Titik Gangguan D

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,2610 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,26 detik hingga 0,27 detik.



Gambar 4.34. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



Gambar 4.35. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* titik gangguan D gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

4.4 Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) pada Sistem IEEE 7 Generator 57 Bus tanpa *Damping*

Melalui *Single Line Diagram* pada Gambar 4.2 dilakukan simulasi perhitungan CCT dengan mengabaikan nilai *damping* pada setiap generator. Dengan menggunakan metode *critical trajectory* yang merupakan metode perhitungan CCT secara langsung, besar nilai CCT dan *epsilon* pada setiap kondisi gangguan akan bergantung pada jumlah titik *m*. Dimana titik *m* merupakan titik antara *fault-on-trajectory* sampai dengan *end point*. Pada simulasi ini diberikan nilai *m* untuk keseluruhan kondisi gangguan sebesar 10. Sedangkan untuk waktu simulasi program diberikan waktu satu sekon untuk semua jenis gangguan.

4.4.1 Perhitungan CCT untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan satu fasa ketanah dimisalkan terdapat salah satu fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, untuk gangguan kali ini dimisalkan fasa pertama terkena gangguan hubung singkat dan kemudian akan dihitung nilai CCT menggunakan metode perhitungan secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method* yang merupakan jenis metode simulasi konvensional. Melalui Tabel 4.15 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Dari hasil tersebut didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.15. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* gangguan satu fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Yang Diusulkan		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1012	1,4553	0,10-0,11	214,553	0
B	1-15	0,1023	1,4260	0,10-0,11	214,260	0
C	2-3	0,0971	1,4602	0,09-0,10	214,602	0
D	3-4	0,1010	1,2909	0,10-0,11	212,909	0
E	3-15	0,1000	1,9669	0,10-0,11	219,669	0
F	4-5	0,1008	1,8513	0,10-0,11	218,513	0

Lanjutan Tabel 4.15. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* gangguan satu fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Yang Diusulkan		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
G	6-5	0,1008	1,5925	0,10-0,11	215,925	0
H	6-8	0,0963	1,3692	0,09-0,10	213,692	0
I	7-8	0,0966	1,5735	0,09-0,10	215,735	0
J	8-9	0,0939	2,1628	0,09-0,10	221,628	0
K	9-10	0,1000	1,4558	0,10-0,11	214,558	0
L	9-55	0,1000	1,5748	0,10-0,11	215,748	0
M	11-13	0,1009	1,4728	0,10-0,11	214,728	0
N	12-10	0,1002	1,3611	0,10-0,11	213,611	0
O	12-13	0,1002	1,4334	0,10-0,11	214,334	0
P	14-15	0,1001	1,4844	0,10-0,11	214,844	0
RATA - RATA			1,5581		215,581	

Pada metode *numerical simulation method* termasuk dalam jenis perhitungan tidak langsung karena hasil CCT yang didapat masih dalam range waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil dan bukan berupa langsung pasti seperti dalam hasil CCT yang didapatkan pada metode perhitungan langsung. Sebagai contoh titik gangguan A memiliki range CCT dalam *numerical simulation method* sebesar 0,10 detik sampai 0,11 detik. Nilai 0,10 detik merupakan batas waktu pemutusan stabil dalam sistem, ketika gangguan diputus sebelum waktu tersebut sistem masih dalam kondisi stabil. Sedangkan, untuk nilai waktu 0,11 detik merupakan batas waktu pemutusan tidak stabil, ketika gangguan diputus melebihi batas waktu tersebut sistem berada dalam kondisi tidak stabil. Jadi batas waktu 0,10-0,11 merupakan *clearing time* dari sistem tersebut. Sedangkan untuk metode perhitungan langsung didapatkan nilai CCT sebesar 0,1012 detik. Jadi dapat disimpulkan hasil metode perhitungan langsung masih berda dalam range waktu CCT untuk metode simulasi konvensional.

Kemudian jika dibandingkan waktu simulasi dalam metode perhitungan langsung yang ditunjukkan oleh CPU memiliki durasi waktu yang lebih cepat. Waktu dalam simulasi metode perhitungan langsung didapatkan melalui keseluruhan waktu simulasi hingga mendapatkan nilai

CCT secara langsung dan tentunya bergantung pada iterasi tiap perhitungan. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* waktu menentukan range CCT didapatkan *trial* dan *error* sampai mendapatkan batas CCT yang sesuai. Dimisalkan untuk mendapatkan batas CCT yang sesuai dibutuhkan percobaan sebanyak 10 kali dengan masing-masing percobaan membutuhkan waktu 20 detik, maka waktu yang dibutuhkan menentukan batas CCT dalam metode *numerical simulation method* adalah sebagai berikut:

$$CPU(s) = 10 \times (20 + \text{waktu simulasi program})$$

Untuk nilai *error* dalam simulasi didapatkan dengan membandingkan nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung dengan nilai waktu batas stabil atau *tcs* dan nilai waktu batas tidak stabil atau *tcu* menggunakan perhitungan berikut:

$$\text{error} = \frac{\text{CCT perhitungan langsung} - \text{tcu atau tcs}}{\text{tcu atau tcs}} \times 100 \%$$

Dimana batas bawah atau nilai *tcu* digunakan ketika nilai CCT kurang dari batas *tcu*. Sedangkan batas atas atau nilai *tcs* digunakan ketika nilai CCT melebihi batas *tcs*.

Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan satu fasa ke tanah tanpa *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan P. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

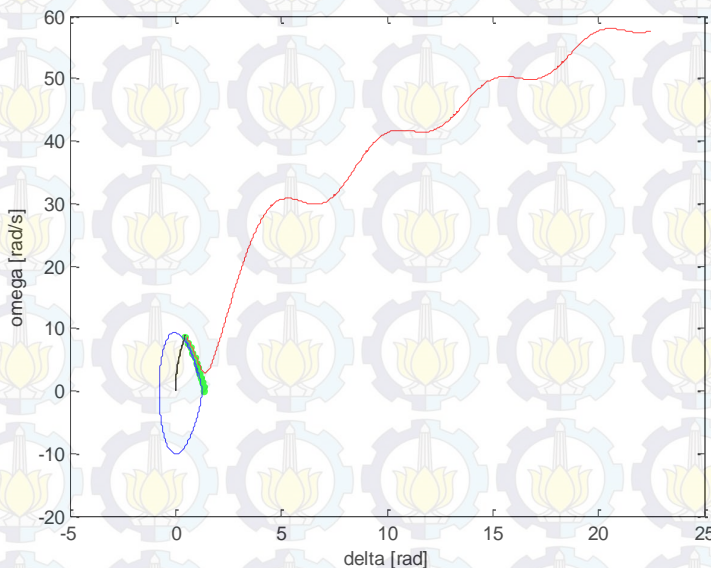
4.4.1.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Pada Gambar 4.36 hingga Gambar 4.39 akan diberikan hasil plotting grafik berdasarkan simulasi yang telah dijalankan, dengan sampel titik gangguan A dan B. Grafik yang dihasilkan berupa grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil. Grafik yang dihasilkan diwakili oleh *critical generator* yang ada dalam sistem 7 generator 57 bus. Analisis karakteristik grafik dalam kondisi stabil dimana gangguan yang terjadi diputus sebelum nilai batas bawah atau berada dalam rentang CCT yang didapat melalui metode *numerical simulation method* diwakili oleh kurva berwarna “biru” sedangkan untuk

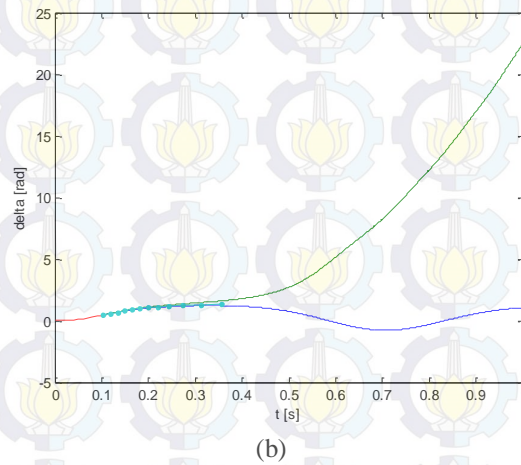
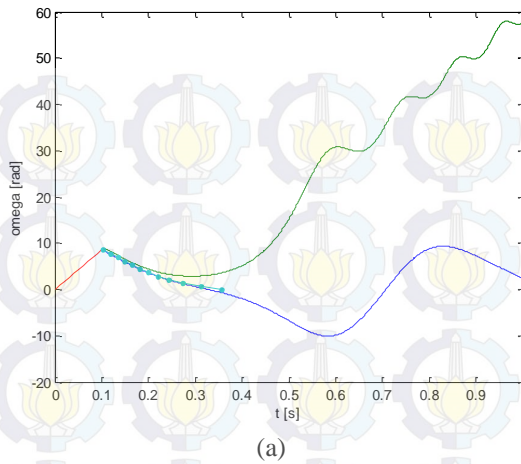
kurva berwarna “merah” mewakili kondisi sistem tidak stabil karena pemutusan gangguan melebihi nilai batas atas CCT yang didapat dari *numerical simulation method*. Sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan *critical trajectory* hasil dari simulasi sehingga didapatkan nilai CCT secara langsung. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan B untuk jenis gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dalam sistem 7 Generator 57 Bus tanpa *damping*.

- Titik Gangguan A

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1012 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



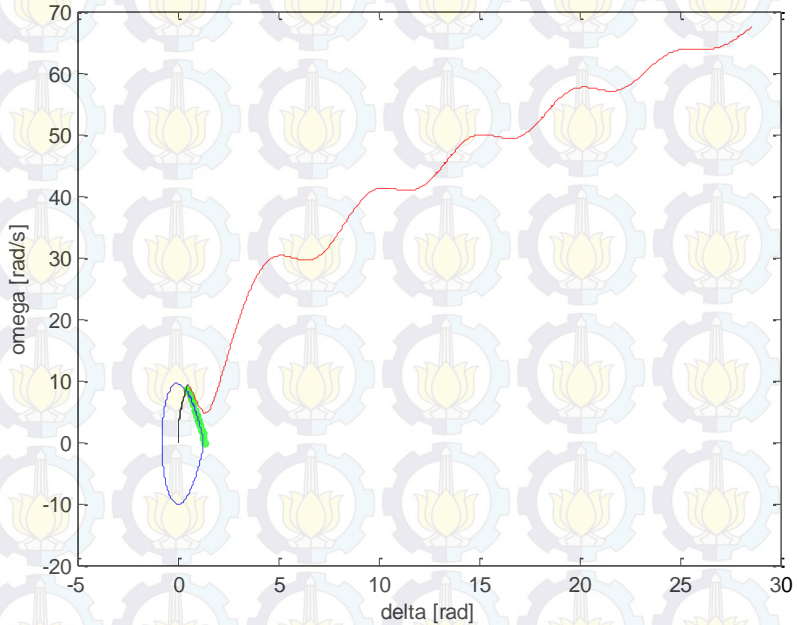
Gambar 4.36. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.



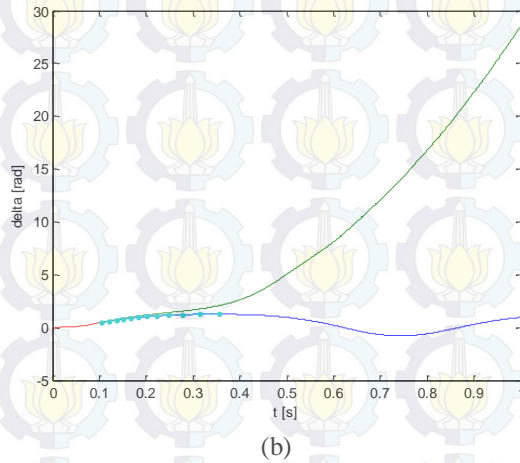
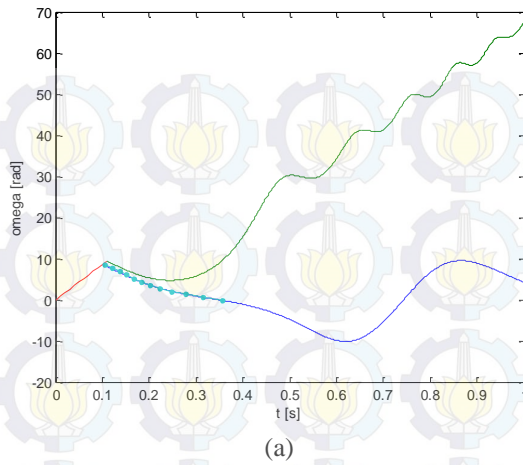
Gambar 4.37. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

- Titik Gangguan B

Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1023 detik. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



Gambar 4.38. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.



Gambar 4.39. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

4.4.2 Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan dua fasa ke tanah dimisalkan terdapat dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Untuk simulasi perhitungan kali ini dimisalkan fasa pertama dan fasa kedua terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Dari gangguan tersebut kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.16 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.16. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* gangguan dua fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1013	1,3919	0,10-0,11	213,919	0
B	1-15	0,1023	1,2171	0,10-0,11	212,171	0
C	2-3	0,0968	0,4222	0,09-0,10	204,222	0
D	3-4	0,1010	0,3637	0,10-0,11	203,637	0
E	3-15	0,1000	0,4699	0,10-0,11	204,699	0
F	4-5	0,1009	0,5143	0,10-0,11	205,143	0
G	6-5	0,1008	0,4490	0,10-0,11	204,49	0
H	6-8	0,0965	0,4207	0,09-0,10	204,207	0
I	7-8	0,0964	0,4896	0,09-0,10	204,896	0
J	8-9	0,0944	0,6314	0,09-0,10	206,314	0
K	9-10	0,1001	0,4209	0,10-0,11	204,209	0
L	9-55	0,1004	0,4026	0,10-0,11	204,026	0
M	11-13	0,1001	0,4298	0,10-0,11	204,298	0
N	12-10	0,1002	0,3842	0,10-0,11	203,842	0
O	12-13	0,1000	0,4008	0,10-0,11	204,008	0
P	14-15	0,1001	0,4197	0,10-0,11	204,197	0
RATA - RATA			0,5517		205,517	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan dua fasa ke tanah tanpa *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan P. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

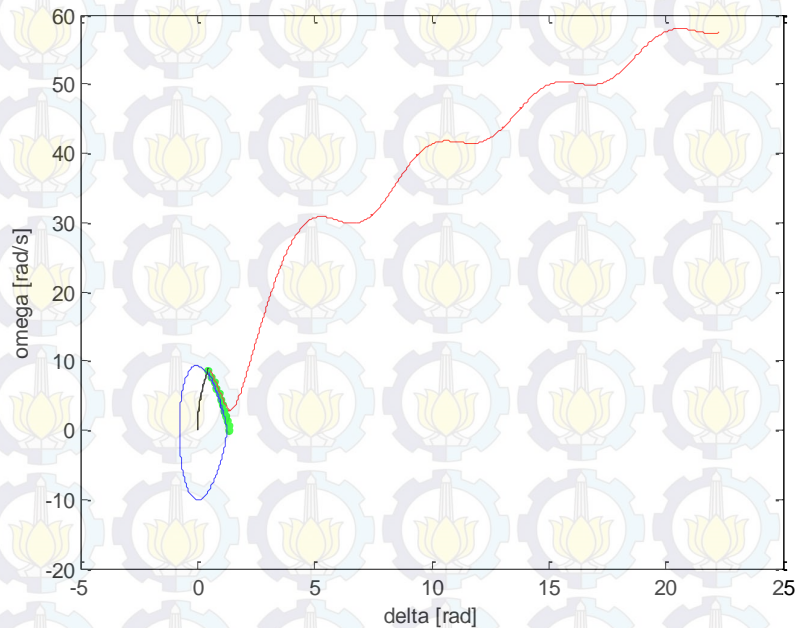
4.4.2.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa, untuk jenis gangguan dua fasa ke tanah juga akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil dengan sampel titik gangguan A dan B yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.40 hingga Gambar 4.43. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A, dan titik gangguan B untuk jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dalam sistem 7 Generator 57 Bus tanpa *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

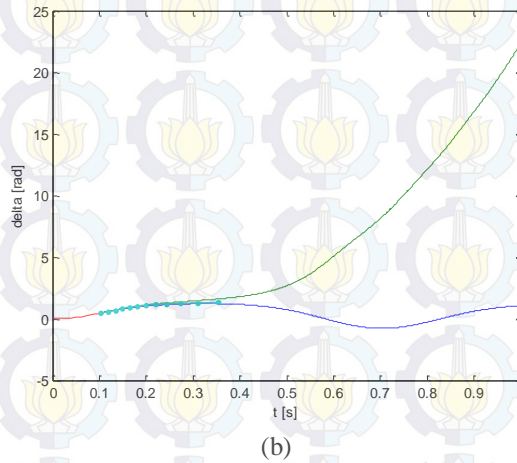
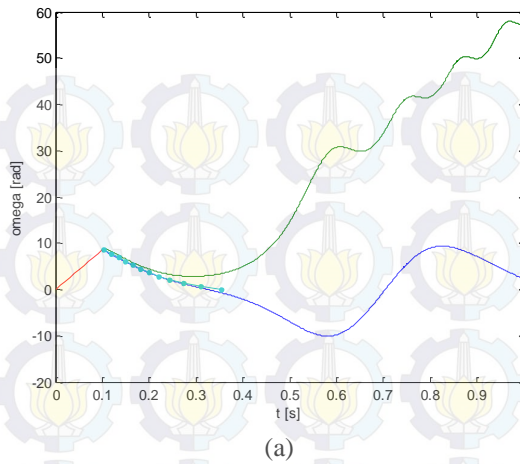
- Titik Gangguan A

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,1013 detik yang

ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



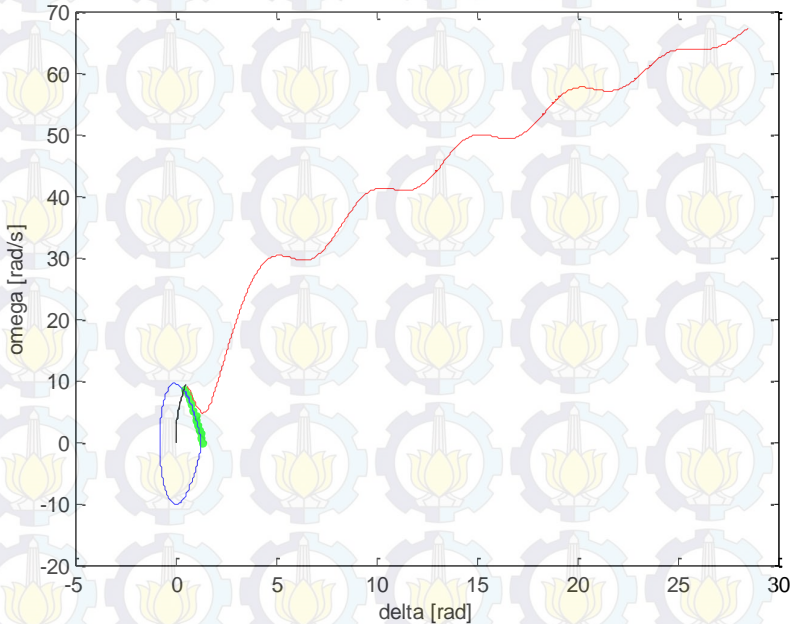
Gambar 4.40. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.



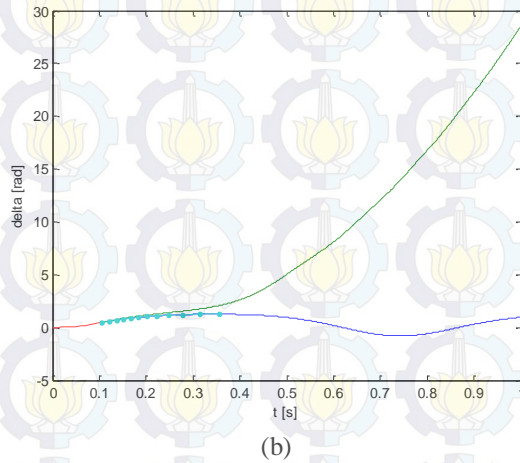
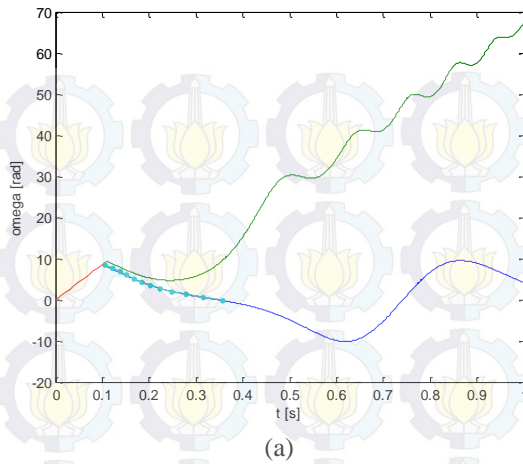
Gambar 4.41. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

- Titik Gangguan B

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,1023 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



Gambar 4.42. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan AB gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.



Gambar 4.43. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

4.4.3 Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa

Simulasi perhitungan CCT gangguan antar fasa ketanah dimisalkan terdapat dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat. Untuk simulasi perhitungan kali ini dimisalkan fasa pertama dan fasa kedua terjadi gangguan hubung singkat. Dari gangguan tersebut kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.17 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.17. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* gangguan antar fasa

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Yang Diusulkan		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1011	0,4019	0,10-0,11	204,019	0
B	1-15	0,1023	0,3847	0,10-0,11	203,847	0
C	2-3	0,0961	0,4208	0,09-0,10	204,208	0
D	3-4	0,1010	0,3671	0,10-0,11	203,671	0
E	3-15	0,1000	0,4696	0,10-0,11	204,696	0
F	4-5	0,1008	0,5055	0,10-0,11	205,055	0
G	6-5	0,1008	0,4588	0,10-0,11	204,588	0
H	6-8	0,0963	0,4281	0,09-0,10	204,281	0
I	7-8	0,0966	0,4933	0,09-0,10	204,933	0
J	8-9	0,0939	0,4840	0,09-0,10	204,84	0
K	9-10	0,1000	0,4289	0,10-0,11	204,289	0
L	9-55	0,1000	0,4037	0,10-0,11	204,037	0
M	11-13	0,1009	0,5154	0,10-0,11	205,154	0
N	12-10	0,1002	0,3842	0,10-0,11	203,842	0
O	12-13	0,1002	0,4003	0,10-0,11	204,003	0
P	14-15	0,1001	0,4192	0,10-0,11	204,192	0
RATA - RATA			0,4353		204,353	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

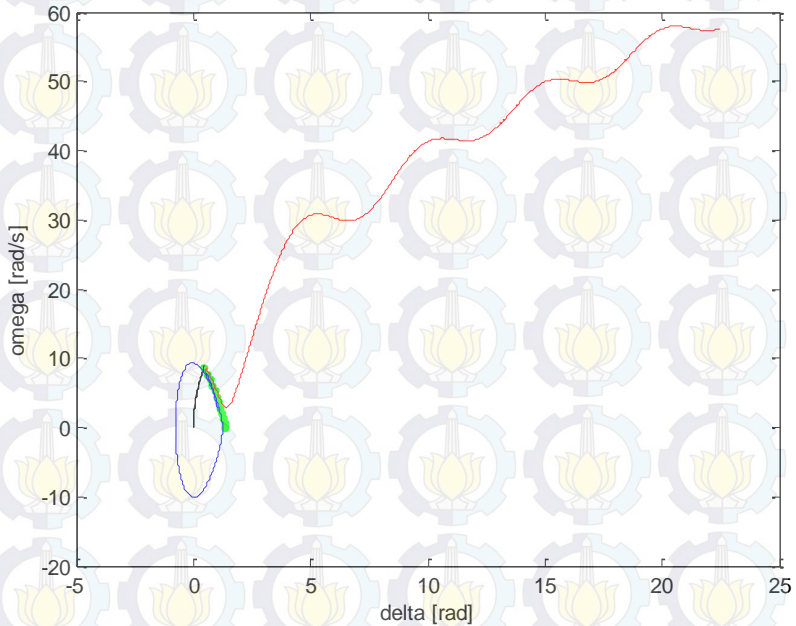
Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan antar fasa tanpa *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan P. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

4.4.3.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa

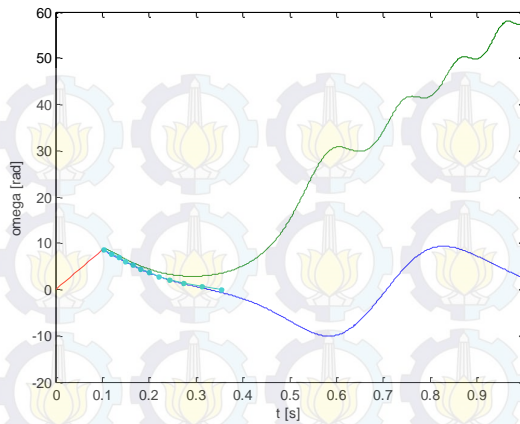
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa, untuk jenis gangguan antar fasa juga akan diberikan grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil dengan sampel titik gangguan A dan B yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.44 hingga Gambar 4.47. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan B untuk jenis gangguan hubung singkat antar fasa dalam sistem 7 Generator 57 Bus tanpa *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

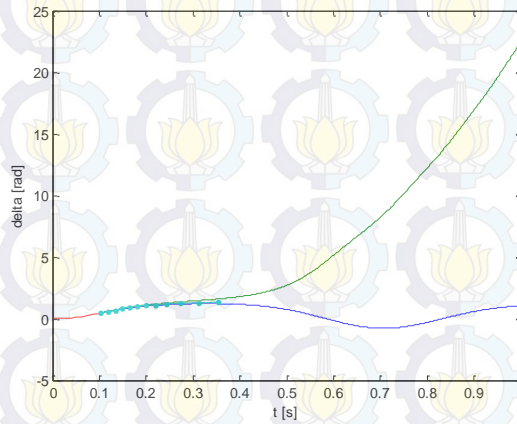
Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,1011 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



Gambar 4.44. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat antar fasa



(a)

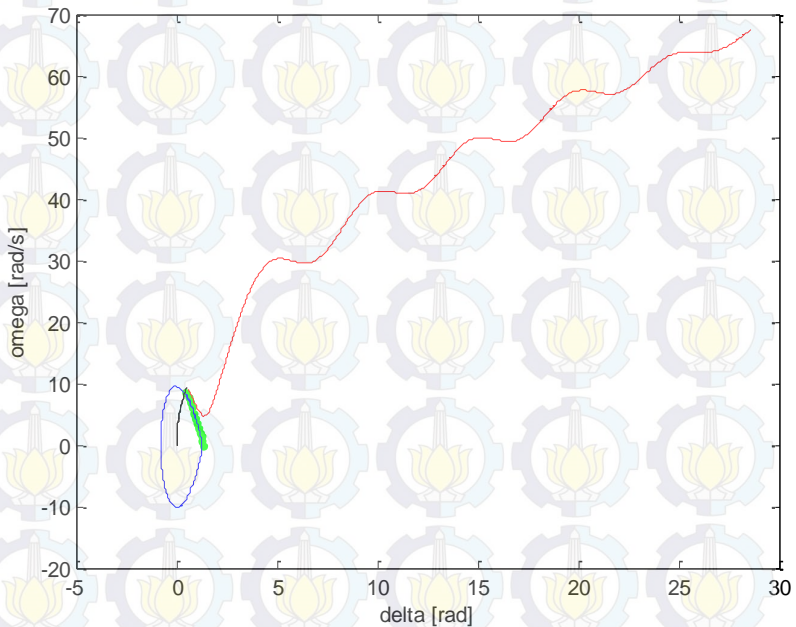


(b)

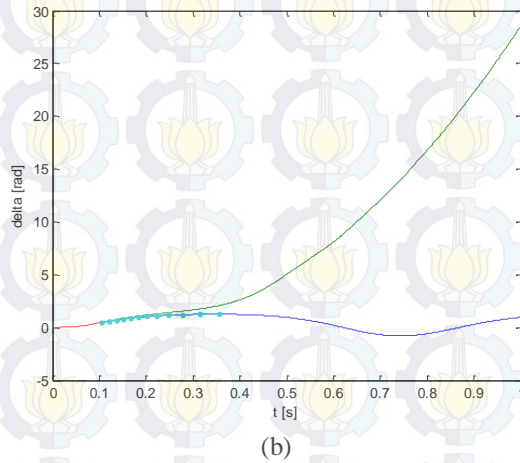
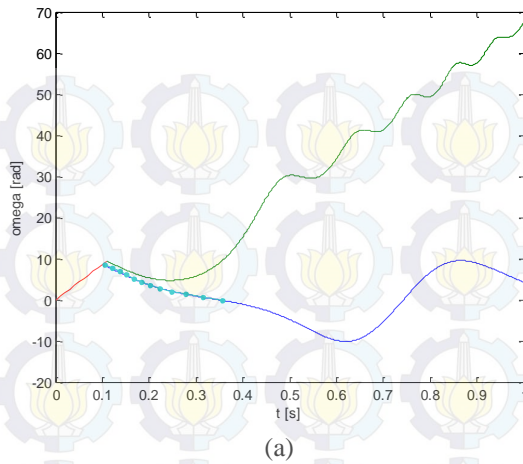
Gambar 4.45. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat antar fasa.

- Titik Gangguan B

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,1023 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



Gambar 4.46. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat antar fasa



Gambar 4.47. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat antar fasa.

4.4.4 Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan tiga fasa ketanah dimisalkan ketiga fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Dari gangguan tersebut kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method* yang merupakan jenis metode simulasi konvensional. Melalui Tabel 4.18 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Dari Tabel tersebut didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.18. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* gangguan tiga fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Yang Diusulkan		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1013	0,4198	0,10-0,11	204,198	0
B	1-15	0,1023	0,5355	0,10-0,11	205,355	0
C	2-3	0,0969	0,4226	0,09-0,10	204,226	0
D	3-4	0,1010	0,3668	0,10-0,11	203,668	0
E	3-15	0,0989	0,466	0,10-0,11	204,66	0
F	4-5	0,1009	0,519	0,10-0,11	205,19	0
G	6-5	0,1009	0,4531	0,10-0,11	204,531	0
H	6-8	0,0965	0,4161	0,09-0,10	204,161	0
I	7-8	0,0969	0,4859	0,09-0,10	204,859	0
J	8-9	0,0944	0,626	0,09-0,10	206,26	0
K	9-10	0,1001	0,4179	0,10-0,11	204,179	0
L	9-55	0,1004	0,4042	0,10-0,11	204,042	0
M	11-13	0,1010	0,3806	0,10-0,11	203,806	0
N	12-10	0,1002	0,4209	0,10-0,11	204,209	0
O	12-13	0,1002	0,4024	0,10-0,11	204,024	0
P	14-15	0,1001	0,4173	0,10-0,11	204,173	0
RATA - RATA			0,4471		204,471	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan

dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan dua fasa ke tanah tanpa *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan P. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

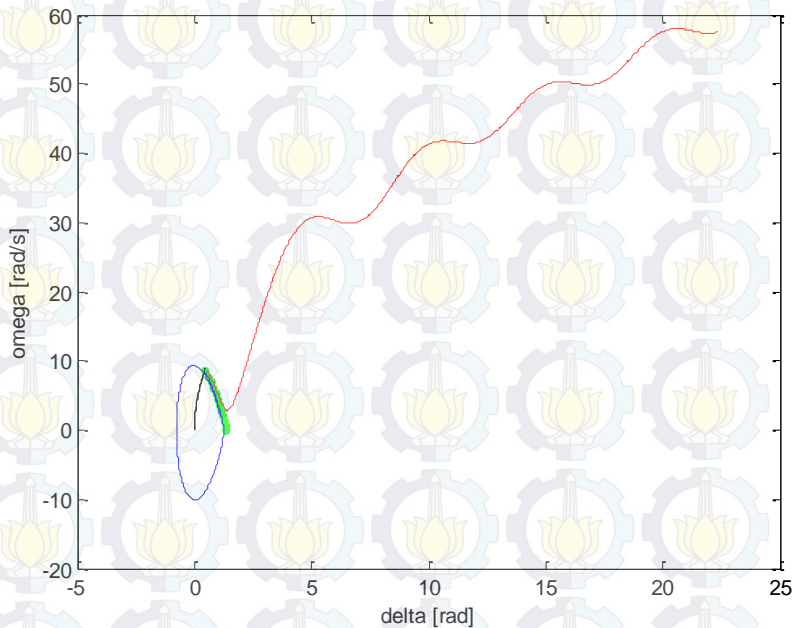
4.4.4.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah

Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa, untuk jenis gangguan tiga fasa ke tanah juga akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil dengan sampel titik gangguan A dan titik gangguan B yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.48 hingga Gambar 4.51. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan B untuk jenis gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah dalam sistem 7 Generator 57 Bus tanpa *damping*.

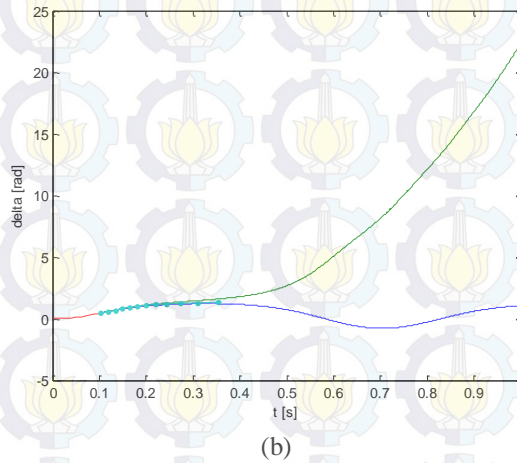
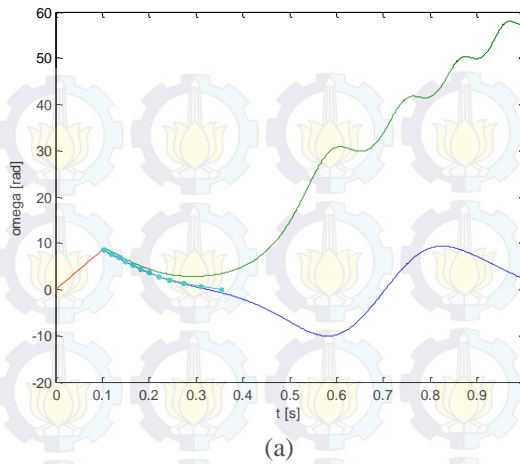
- Titik Gangguan A

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,1013 detik yang

ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



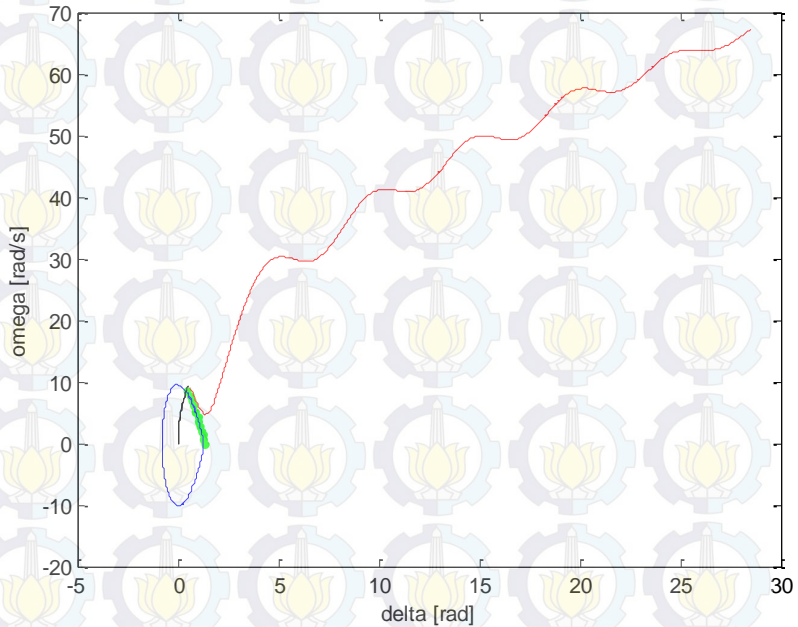
Gambar 4.48. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



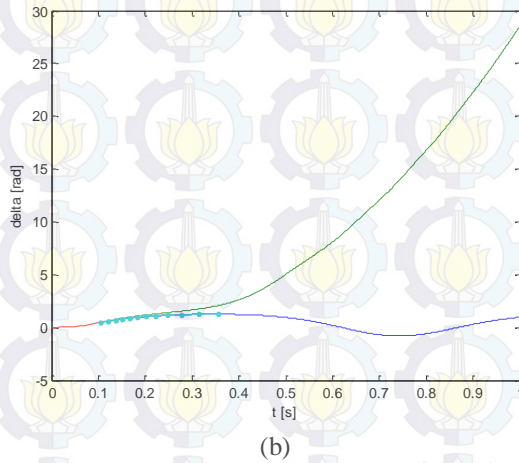
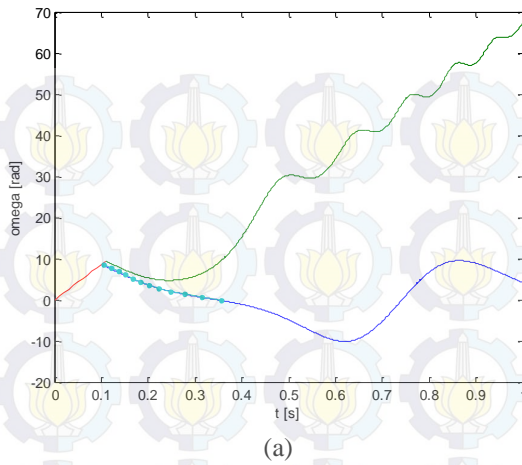
Gambar 4.49. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

- Titik Gangguan B

Dari hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode perhitungan langsung didapat nilai CCT sebesar 0,1023 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,10 detik hingga 0,11 detik.



Gambar 4.50. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



Gambar 4.51. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

4.5 Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) pada Sistem Anderson dan Fouad 7 Generator 57 Bus Menggunakan *Damping*

Melalui *Single Line Diagram* pada Gambar 4.2 dilakukan simulasi perhitungan CCT dengan memasukkan nilai *damping* pada setiap generator sebesar 5%. Dengan menggunakan metode *critical trajectory* yang merupakan metode perhitungan CCT secara langsung didapatkan besar nilai CCT dan *epsilon* pada setiap kondisi gangguan akan bergantung jumlah nilai *m*. Dimana nilai *m* merupakan jumlah titik antara *fault-on-trajectory* sampai dengan *end point*. Pada simulasi ini diberikan nilai *m* untuk keseluruhan kondisi gangguan sebesar 10. Untuk waktu simulasi program diberikan waktu satu sekon untuk tiap jenis gangguan

4.5.1 Perhitungan CCT untuk Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan satu fasa ketanah dimisalkan terdapat salah satu fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Untuk kali ini dimisalkan fasa pertama dalam sistem terjadi gangguan hubung singkat kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.19 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4. 19. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* gangguan satu fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Yang Diusulkan		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1137	0,3672	0,11-0,12	203,672	0
B	1-15	0,1129	0,3982	0,11-0,12	203,982	0
C	2-3	0,1074	0,4339	0,10-0,11	204,339	0
D	3-4	0,1117	0,4778	0,11-0,12	204,778	0
E	3-15	0,1107	0,5346	0,11-0,12	205,346	0
F	4-5	0,1108	0,5440	0,11-0,12	205,440	0

Lanjutan Tabel 4.19. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan numerical simulation method untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* gangguan satu fasa ke tanah.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Yang Diusulkan		<i>Numerical Simulation Method</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
G	6-5	0,1114	0,4786	0,11-0,12	204,786	0
H	6-8	0,1102	0,4944	0,11-0,12	204,944	0
I	7-8	0,1103	0,4762	0,11-0,12	204,762	0
J	8-9	0,1064	0,4744	0,10-0,11	204,744	0
K	9-10	0,1117	0,4667	0,11-0,12	204,667	0
L	9-55	0,1101	0,4593	0,11-0,12	204,593	0
M	11-13	0,1110	0,4364	0,11-0,12	204,364	0
N	12-10	0,1104	0,4095	0,11-0,12	204,095	0
O	12-13	0,1105	0,3999	0,11-0,12	203,999	0
P	14-15	0,1103	0,4036	0,11-0,12	204,036	0
RATA - RATA			0,4534		204,534	

Berdasar hasil simulasi diatas terdapat dua metode perhitungan yang akan dibandingkan. Untuk metode *numerical simulation method* merupakan metode perhitungan secara tak langsung dikarenakan nilai CCT yang dihasilkan masih berupa batas atas dan batas bawah, dimana batas bawah merupakan batas waktu pemutusan stabil sedangkan batas atas dari nilai tersebut merupakan batas maksimal pemutusan gangguan agar sistem tetap stabil. Dimisalkan untuk titik gangguan A berdasarkan metode *numerical simulation method* menghasilkan batas CCT 0.11-0.12 detik, hal ini berarti jika gangguan diputus diantara batas nilai tersebut sistem masih dalam batas stabil, sedangkan jika gangguan diputus dalam waktu lebih dari 0,12 detik maka sistem akan mengalami ketidakstabilan. Untuk metode yang diusulkan yakni metode perhitungan langsung, yakni nilai CCT yang didapat berupa nilai langsung bukan berupa batas nilai, seperti nilai CCT pada gangguan A pada metode perhitungan langsung didapatkan nilai 0,1137, nilai tersebut masih berada dalam nilai *range* CCT yang didapatkan melalui metode *numerical simulation method* atau metode simulasi konvensional.

Untuk waktu simulasi (CPU) metode perhitungan langsung didasarkan pada waktu simulasi program sampai didapatkan nilai CCT

secara langsung. Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* menggunakan sistem *trial and error* untuk mendapatkan nilai batas pemutusan. Dimisalkan untuk sistem gangguan ini terdapat 20 kali percobaan hingga menemukan batas waktu tersebut. Sehingga persamaan untuk mendapatkan waktu simulasi (CPU) metode *numerical simulation method* adalah sebagai berikut

$$CPU(s) = 10 \times (20 + \text{waktu simulasi program})$$

Dari hasil simulasi diatas masih terdapat error untuk kedua metode. Error dilihat berdasarkan nilai CCT secara langsung dibandingkan dengan nilai batas bawah atau *time clearing stable* (*tcs*) dan batas atas atau *time clearing unstable* (*tcs*). Untuk perhitungan error kedua metode tersebut melalui persamaan berikut

$$\text{error} = \frac{\text{CCT perhitungan langsung} - \text{tcu atau tcs}}{\text{tcu atau tcs}} \times 100 \%$$

Dimana batas bawah atau nilai *tcu* digunakan ketika nilai CCT kurang dari batas *tcu*. Sedangkan batas atas atau nilai *tcs* digunakan ketika nilai CCT melebihi batas *tcs*.

Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan satu fasa ke tanah dengan *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan P. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

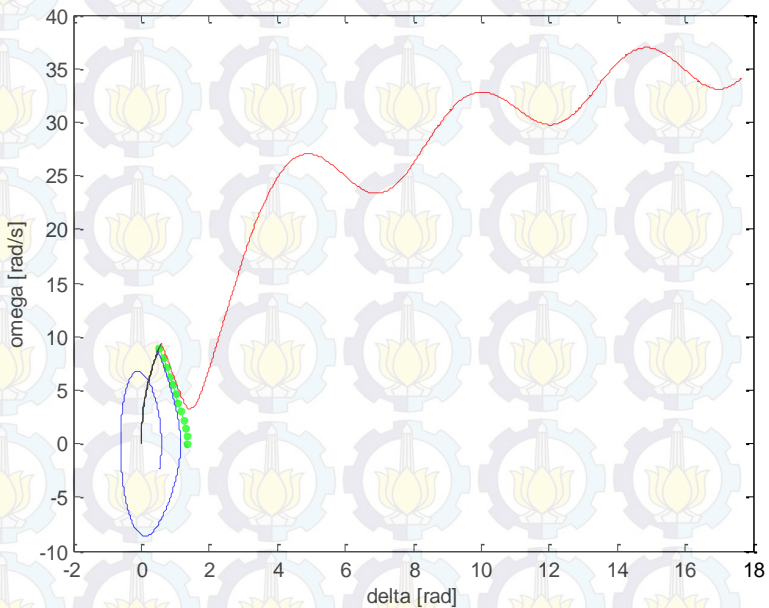
4.5.1.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Pada Gambar 4.52 hingga Gambar 4.55 akan diberikan hasil plotting grafik berdasarkan simulasi yang telah dijalankan, dengan sampel titik gangguan A dan B. Grafik yang dihasilkan berupa grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil. Grafik yang dihasilkan diwakili oleh *critical generator* yang ada dalam sistem 7 generator 57 bus dengan menggunakan *damping*. Analisis karakteristik grafik dalam kondisi stabil dimana gangguan yang terjadi diputus sebelum nilai batas bawah atau berada dalam rentang CCT yang didapat melalui metode *numerical simulation method* diwakili oleh kurva berwarna “biru” sedangkan untuk kurva berwarna “merah” mewakili

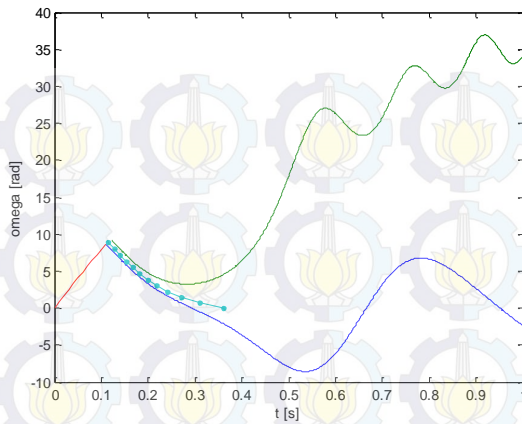
kondisi sistem tidak stabil karena pemutusan gangguan melebihi nilai batas atas CCT yang didapat dari *numerical simulation method*. Sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan *critical trajectory* hasil dari simulasi sehingga didapatkan nilai CCT secara langsung. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan titik gangguan B untuk jenis gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dalam sistem 7 Generator 57 Bus menggunakan *damping*.

- Titik Gangguan A

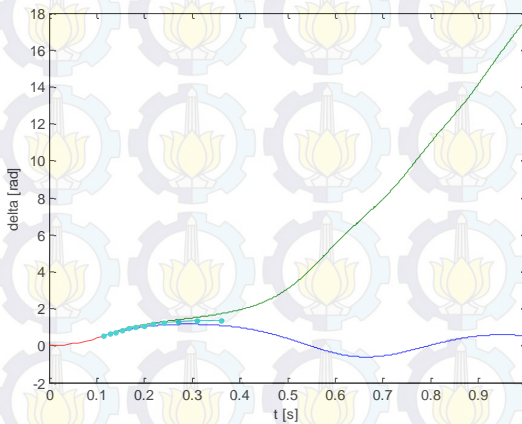
Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1137 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



Gambar 4.52. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.



(a)

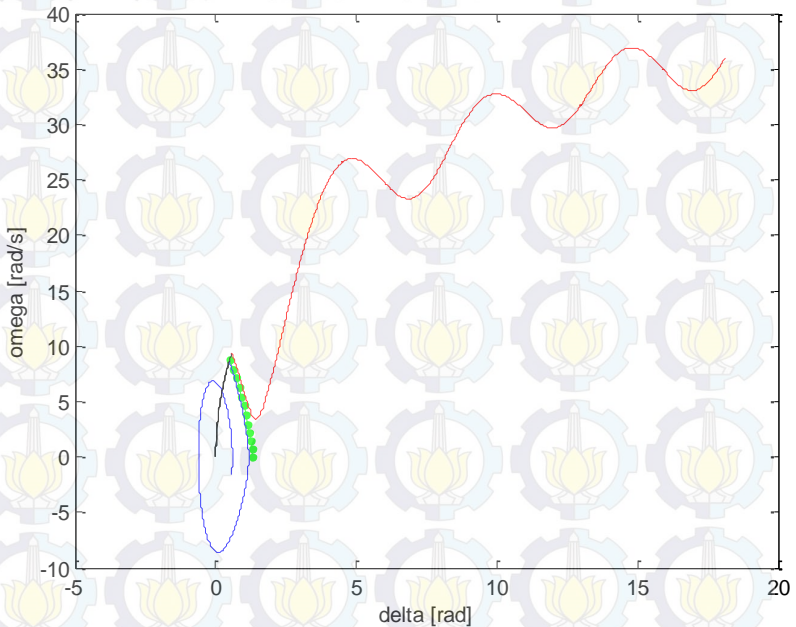


(b)

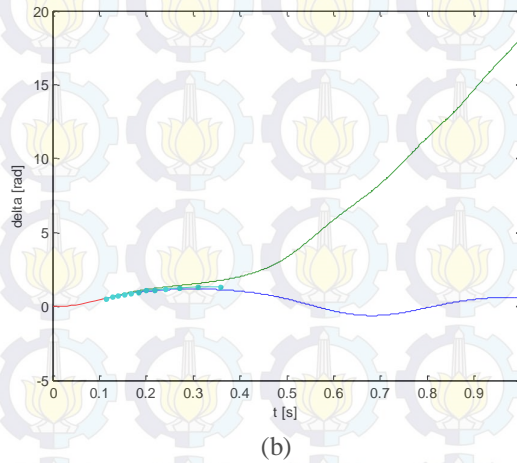
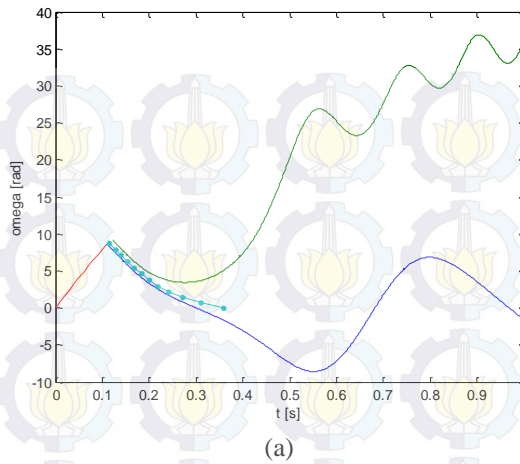
Gambar 4.53. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

- Titik Gangguan B

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1129 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



Gambar 4.54. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.



Gambar 4.55. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

4.5.2 Perhitungan CCT untuk Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan dua fasa ketanah dimisalkan terdapat salah dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, untuk jenis gangguan ini dimisalkan fasa pertama dan kedua terjadi gangguan hubung singkat yang kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.20 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.20. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* gangguan dua fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1139	0,3567	0,11-0,12	203,567	0
B	1-15	0,1134	0,3525	0,11-0,12	203,525	0
C	2-3	0,1072	0,3919	0,10-0,11	203,919	0
D	3-4	0,1111	0,4257	0,11-0,12	204,257	0
E	3-15	0,1108	0,4922	0,11-0,12	204,922	0
F	4-5	0,1109	0,4924	0,11-0,12	204,924	0
G	6-5	0,1115	0,7018	0,11-0,12	207,018	0
H	6-8	0,1105	0,5098	0,11-0,12	205,098	0
I	7-8	0,1103	0,5102	0,11-0,12	205,102	0
J	8-9	0,1148	0,5068	0,10-0,11	205,068	0
K	9-10	0,1107	0,4713	0,11-0,12	204,713	0
L	9-55	0,1101	0,4682	0,11-0,12	204,682	0
M	11-13	0,1116	0,4613	0,11-0,12	204,613	0
N	12-10	0,1105	0,4464	0,11-0,12	204,464	0
O	12-13	0,1106	0,4665	0,11-0,12	204,665	0
P	14-15	0,1108	0,3958	0,11-0,12	203,958	0
RATA - RATA			0,4655		204,655	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

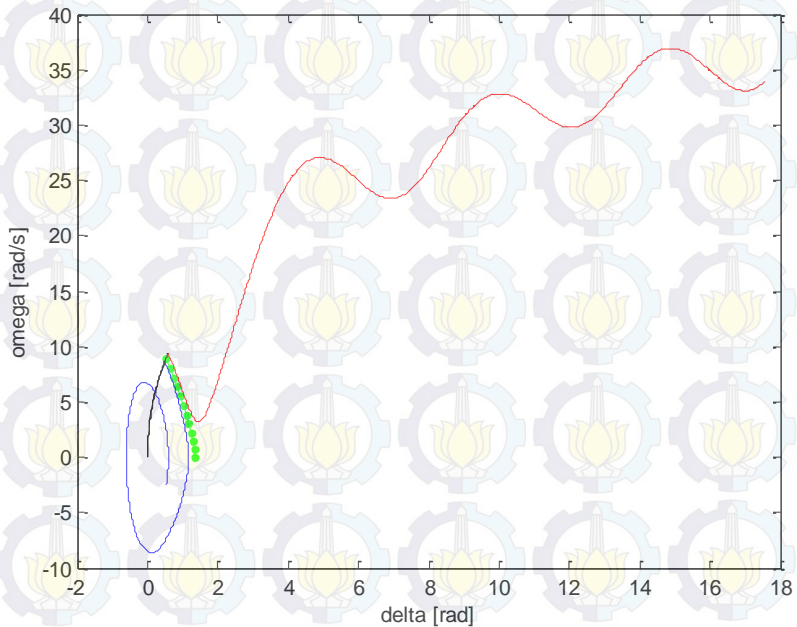
Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan dua fasa ke tanah tanpa *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan P. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

4.5.2.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Dua Fasa ke Tanah

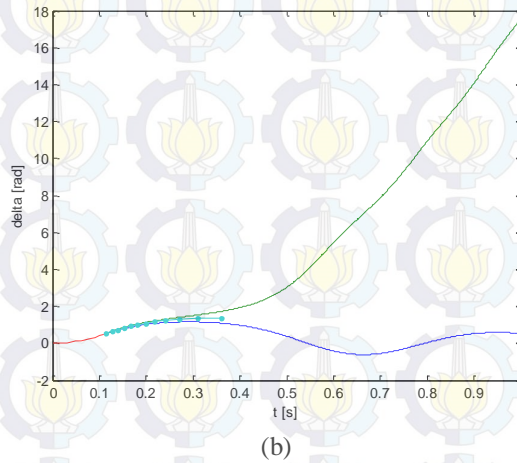
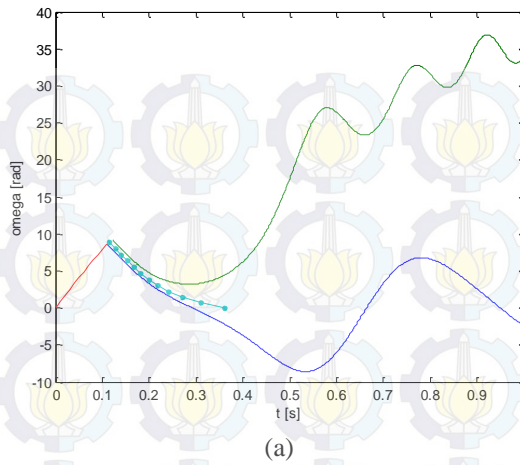
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa ke tanah, untuk jenis gangguan dua fasa ke tanah akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil, grafik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (t) serta grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (t) dengan sampel titik gangguan A dan titik gangguan B dan yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.56 hingga Gambar 4.59. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan B untuk jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dalam sistem 7 Generator 57 Bus menggunakan *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1139 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



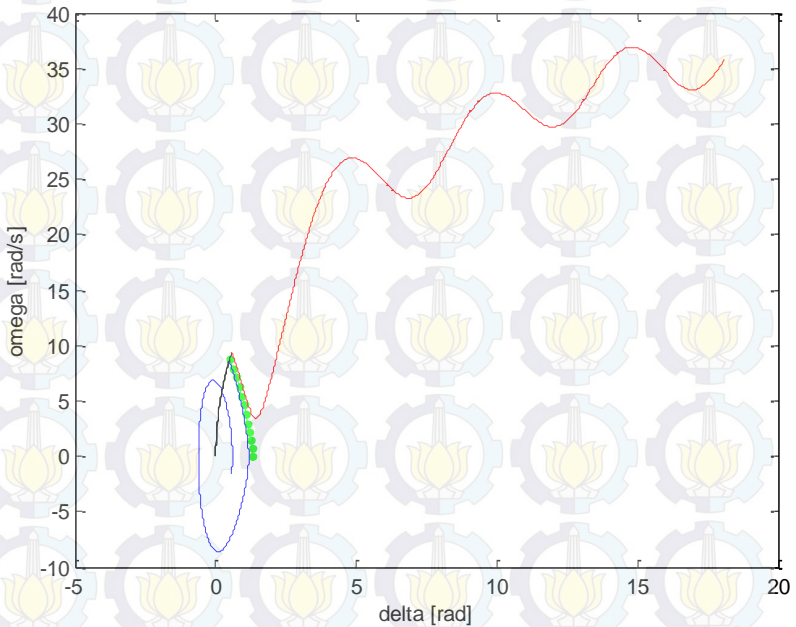
Gambar 4.56. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.



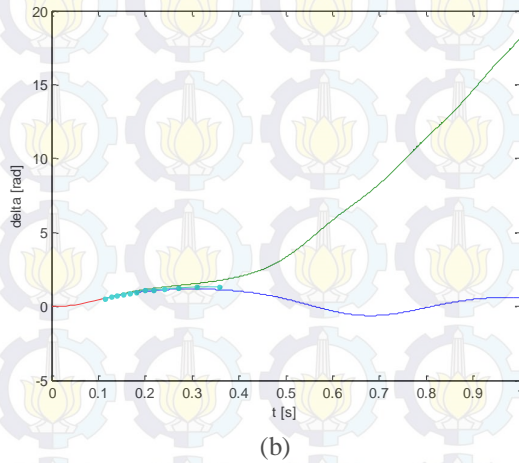
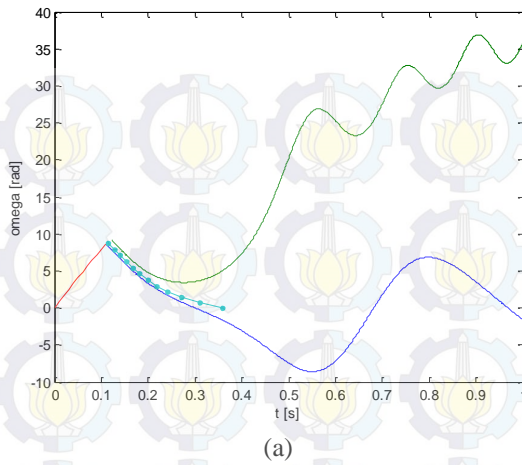
Gambar 4.57. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

- Titik Gangguan B

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1134 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



Gambar 4.58. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.



Gambar 4.59. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

4.5.3 Perhitungan CCT untuk Gangguan Antar Fasa

Simulasi perhitungan CCT gangguan dua fasa ketanah dimisalkan terdapat salah dua fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat dimisalkan yang mengalami gangguan hubung singkat adalah fasa pertama dan kedua. Kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan menggunakan metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.21 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.21. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* gangguan antar fasa

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1138	0,4204	0,11-0,12	204,204	0
B	1-15	0,1129	0,4351	0,11-0,12	204,351	0
C	2-3	0,1074	0,4514	0,10-0,11	204,514	0
D	3-4	0,1107	0,4817	0,11-0,12	204,817	0
E	3-15	0,1109	0,6137	0,11-0,12	206,137	0
F	4-5	0,1109	0,5489	0,11-0,12	205,489	0
G	6-5	0,1114	0,5063	0,11-0,12	205,063	0
H	6-8	0,1102	0,5175	0,11-0,12	205,175	0
I	7-8	0,1103	0,5369	0,11-0,12	205,369	0
J	8-9	0,1064	0,5094	0,10-0,11	205,094	0
K	9-10	0,1117	0,4528	0,11-0,12	204,528	0
L	9-55	0,1102	0,4535	0,11-0,12	204,535	0
M	11-13	0,1107	0,4154	0,11-0,12	204,154	0
N	12-10	0,1107	0,3984	0,11-0,12	203,984	0
O	12-13	0,1112	0,425	0,11-0,12	204,25	0
P	14-15	0,1103	0,4243	0,11-0,12	204,243	0
RATA - RATA			0,4744		204,744	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan dua fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

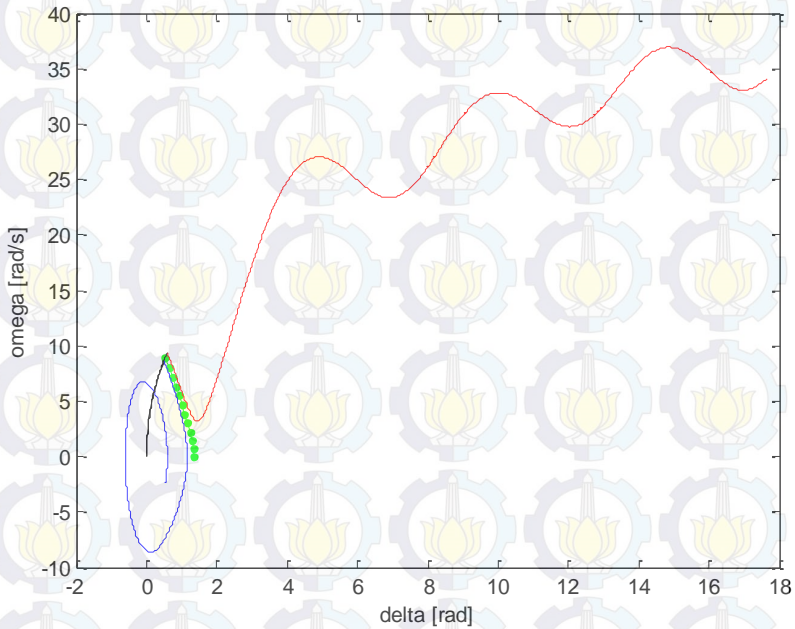
Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan antar fasa menggunakan *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan P. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

4.5.3.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Antar Fasa

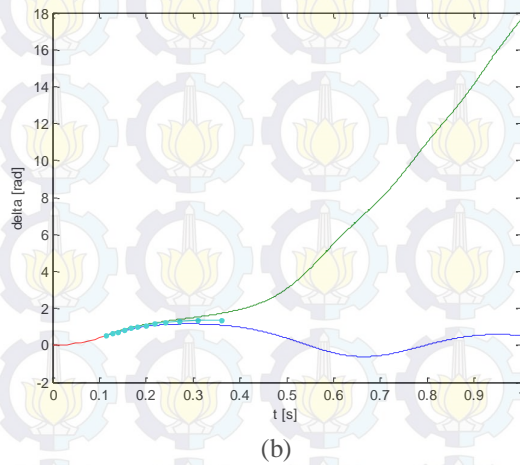
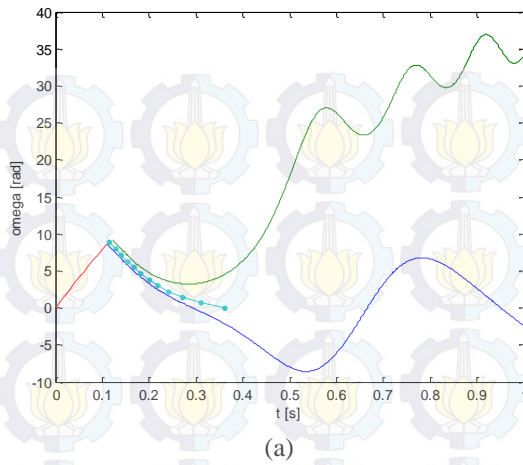
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan antar fasa ke tanah, untuk jenis gangguan antar fasa akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil, grafik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (t) serta grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (t) dengan sampel titik gangguan A dan titik gangguan B yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.60 hingga Gambar 4.63. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan B untuk jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dalam sistem 7 Generator 57 Bus menggunakan *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1138 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



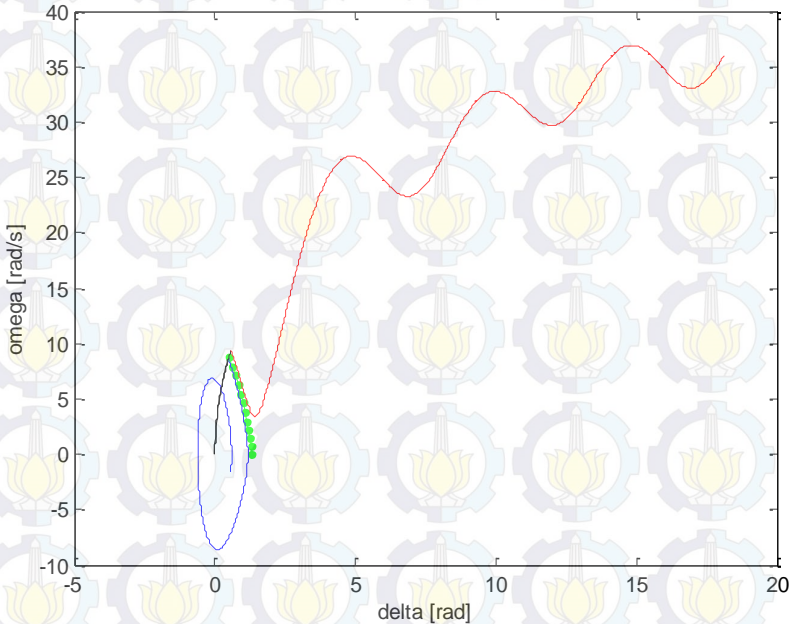
Gambar 4.60. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat antar fasa.



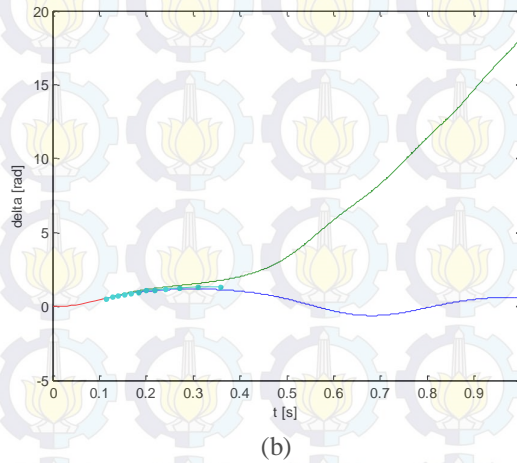
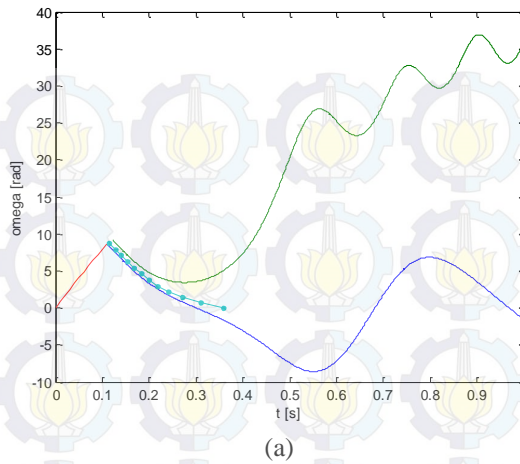
Gambar 4.61. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

- Titik Gangguan B

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1129 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



Gambar 4.62. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat antar fasa.



Gambar 4.63. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung antar fasa.

4.5.4 Perhitungan CCT untuk Gangguan Tiga Fasa ke Tanah

Simulasi perhitungan CCT gangguan tiga fasa ketanah dimisalkan ketiga fasa pada saluran transmisi sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Nilai CCT melalui metode perhitungan secara langsung akan dibandingkan dengan nilai CCT yang didapatkan melalui metode *numerical simulation method*. Melalui Tabel 4.22 diberikan nilai CCT melalui perhitungan secara langsung dan melalui metode konvensional. Didapatkan nilai CCT yang mendekati dengan kedua metode perhitungan tersebut.

Tabel 4.22. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* gangguan tiga fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1139	0,3877	0,11-0,12	203,877	0
B	1-15	0,1146	0,419	0,11-0,12	204,19	0
C	2-3	0,1076	0,4565	0,10-0,11	204,565	0
D	3-4	0,1117	0,5133	0,11-0,12	205,133	0
E	3-15	0,1120	0,5983	0,11-0,12	205,983	0
F	4-5	0,1109	0,5721	0,11-0,12	205,721	0
G	6-5	0,1115	0,5072	0,11-0,12	205,072	0
H	6-8	0,1104	0,5054	0,11-0,12	205,054	0
I	7-8	0,1103	0,5179	0,11-0,12	205,179	0
J	8-9	0,1064	0,5213	0,10-0,11	205,213	0
K	9-10	0,1117	0,4606	0,11-0,12	204,606	0
L	9-55	0,1104	0,4730	0,11-0,12	204,73	0
M	11-13	0,1115	0,4628	0,11-0,12	204,628	0
N	12-10	0,1105	0,4375	0,11-0,12	204,375	0
O	12-13	0,1106	0,4495	0,11-0,12	204,495	0
P	14-15	0,1110	0,4561	0,11-0,12	204,561	0
RATA - RATA			0,4836		204,836	

Sama dengan gangguan satu fasa ke tanah, perhitungan nilai CPU dan *error* menggunakan cara perhitungan yang serupa. Disesuaikan

dengan banyaknya *trial* yang dilakukan. Untuk gangguan tiga fasa ke tanah diambil percobaan sebanyak 20 kali.

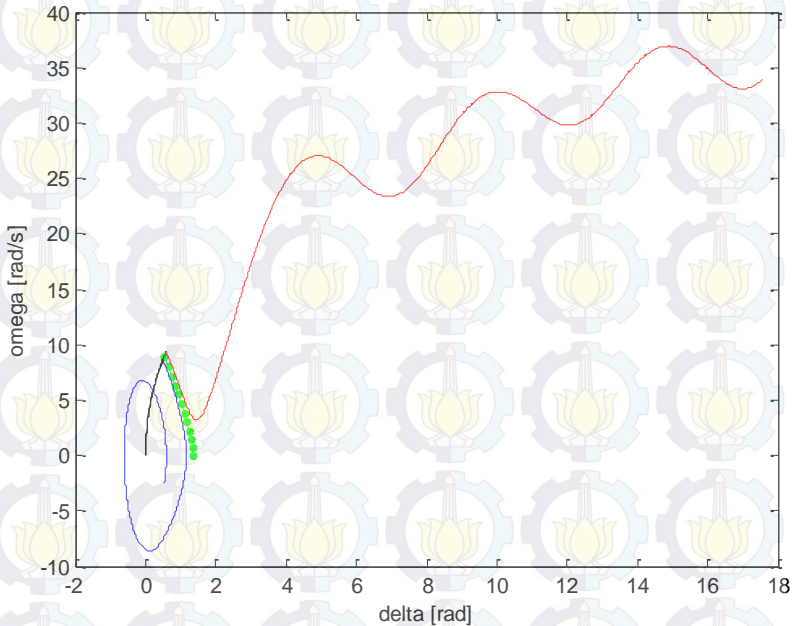
Dari keseluruhan hasil simulasi untuk gangguan tiga fasa ke tanah tanpa *damping* didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan, mulai dari titik gangguan A hingga titik gangguan I. Hal ini berarti nilai CCT yang didapat melalui metode perhitungan langsung berada dalam nilai batas yang didapat melalui metode simulasi konvensional.

4.5.4.1 Analisis Grafik CCT pada Gangguan Tiga Fasa ke Tanah

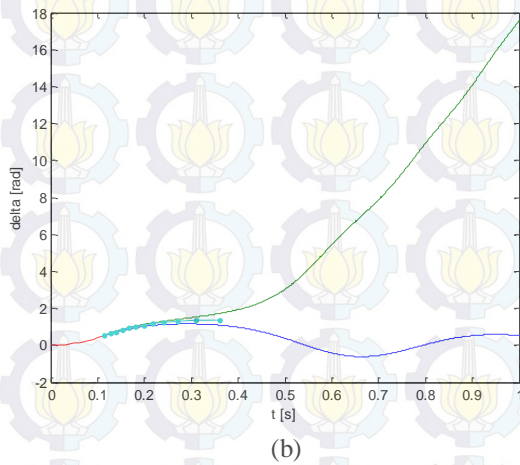
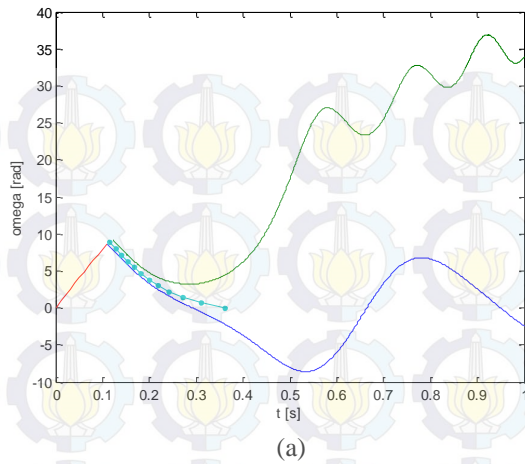
Sama halnya dengan analisis grafik CCT untuk gangguan satu fasa ke tanah, untuk jenis gangguan tiga fasa ke tanah akan diberikan grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil, grafik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (t) serta grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (t) dengan sampel titik gangguan A dan B yang direpresentasikan melalui *critical generator* seperti yang tergambar pada Gambar 4.64 hingga Gambar 4.67. Berikut ini diberikan hasil analisis grafik mulai dari titik gangguan A dan B untuk jenis gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dalam sistem 7 Generator 57 Bus menggunakan *damping*. Dalam Gambar tersebut terlihat respon generator ketika gangguan diputus sebelum nilai CCT yang telah ditentukan dan ketika gangguan diputus setelah nilai CCT yang didapatkan. Ketika gangguan diputus sebelum CCT kecepatan sudut dan sudut rotor akan berosilasi secara beraturan dan tidak terdapat kenaikan nilai secara signifikan berbeda dengan ketika gangguan diputus setelah nilai yang didapat, kecepatan sudut dan sudut rotor akan terus meningkat hingga mencapai kondisi hilangnya sinkronisasi.

- Titik Gangguan A

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1139 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



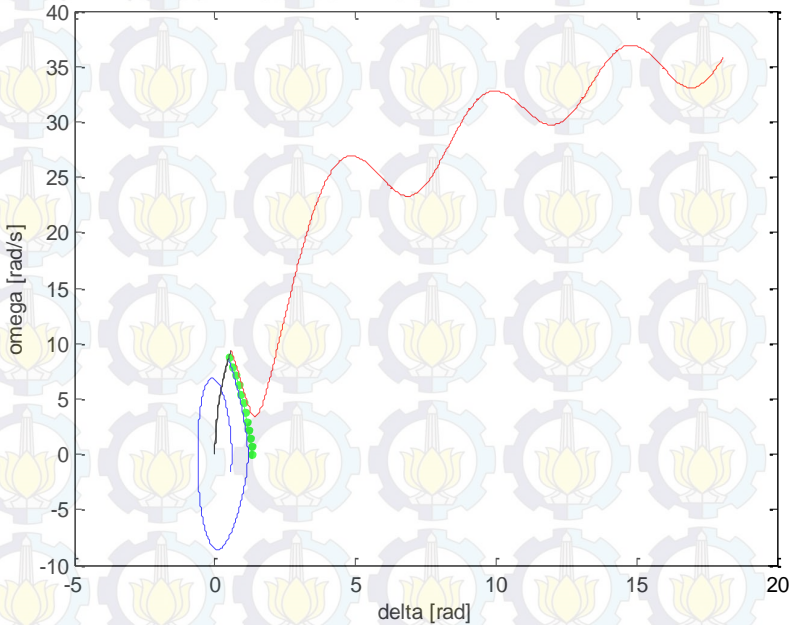
Gambar 4.64. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



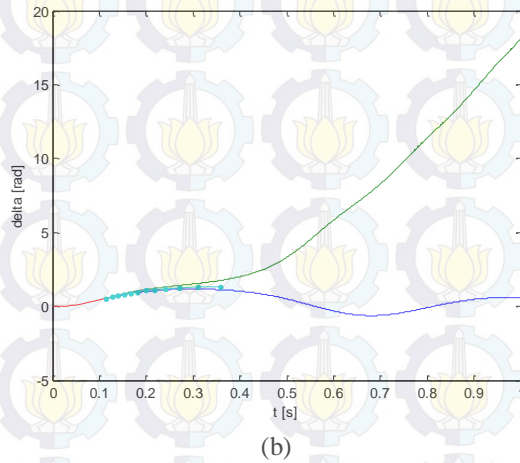
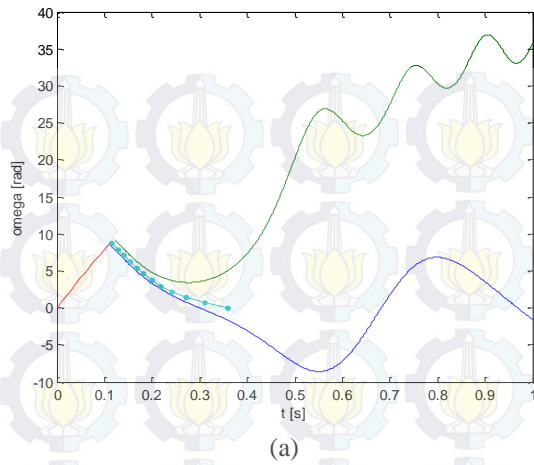
Gambar 4.65. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan A gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

- Titik Gangguan B

Melalui hasil simulasi yang diperoleh menggunakan metode yang diusulkan didapat nilai CCT sebesar 0,1146 detik yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau dalam grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Sedangkan untuk metode *numerical simulation method* didapat CCT dalam rentang 0,11 detik hingga 0,12 detik.



Gambar 4.66. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam satuan rad untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.



Gambar 4.67. (a) Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (b) Grafik karakteristik sudut rotor terhadap waktu untuk sistem 7 generator 57 bus dengan *damping* titik gangguan B gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan proses analisis pada bab sebelumnya untuk perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) pada kondisi *unbalanced* dengan menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* pada sistem multimesin dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Metode perhitungan langsung berdasarkan *critical trajectory* telah mampu memberikan hasil nilai CCT secara langsung untuk semua jenis gangguan hubung singkat, mulai dari jenis gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, antar fasa dan gangguan tiga fasa ke tanah. Dari hasil yang didapat pada masing-masing gangguan juga telah mampu menggambarkan peristiwa kestabilan transien yang direpresentasikan melalui respon sudut rotor.
2. Hasil perhitungan CCT yang didapatkan untuk keseluruhan gangguan hubung singkat telah mampu memberikan batasan kapan gangguan dalam sistem seharusnya diselesaikan. Melalui metode *numerical simulation method* didapatkan *range* pemutusan stabil dan pemutusan tidak stabil. Sedangkan untuk metode perhitungan langsung didapatkan nilai pasti yang pada umumnya berada diantara *range* waktu pemutusan gangguan. Seperti contoh pada gangguan titik A sistem 3 Generator 9 Bus nilai *range* waktu pemutusan berada pada 0.21(s) - 0.22(s) sedangkan untuk nilai pastinya berada dalam waktu 0.2187(2). Dan tentunya untuk keseluruhan hasil simulasi nilai waktu langsung maupun dalam *range* masih berada dalam periode *transient*.
3. Nilai perhitungan CCT tiap gangguan untuk semua titik gangguan dapat dijadikan sebagai waktu referensi pemutusan gangguan oleh CB (*Circuit Breakers*) dengan mengambil nilai paling minimum pada setiap titik gangguan. Dimisalkan untuk sistem 3 generator 9 bus jenis gangguan satu fasa ke tanah. Untuk nilai CCT paling minimum dari titik gangguan A hingga titik gangguan I dengan mengabaikan perhitungan *error* adalah

0,2107 (s). Nilai tersebut dapat dijadikan referensi sebagai waktu pemutusan oleh CB ketika terjadi gangguan hubung singkat.

4. Dari segi waktu simulasi antara metode perhitungan langsung dan metode *numerical simulation method*. Dapat disimpulkan bahwa waktu simulasi untuk metode perhitungan langsung lebih cepat jika dibandingkan dengan metode *numerical simulation method* hal ini dikarenakan pada metode tersebut harus dilakukan *trial and error* hingga mendapatkan respon sudut rotor terhadap kecepatan sudut yang sesuai dengan menggambarkan kondisi stabil dan kondisi tidak stabil. Sebagai contoh pada simulasi pada gangguan satu fasa ke tanah pada sistem 3 generator 9 bus, waktu simulasi berdasarkan metode perhitungan langsung didapatkan nilai 0,3415 (s) sedangkan menggunakan *numerical simulation method* didapatkan nilai 203,41 (s)
5. Dengan menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* telah mendapatkan hasil yang akurat dengan nilai *error* yang didapatkan untuk keseluruhan simulasi kurang dari 2%. Dan keseluruhan nilai *error* yang didapat memiliki waktu pemutusan lebih cepat dibandingkan dengan *range* waktu yang didapat. Sebagai contoh untuk sistem 3 generator-9bus titik gangguan B didapatkan nilai CCT langsung sebesar 0,1966 (s) sedangkan *range* waktu pemutusannya berada dalam 0,20(s)-0,21(s).

5.2 Saran

1. Dalam upaya pengembangan penelitian mengenai metode perhitungan CCT secara langsung perlu dikembangkan perhitungan CCT untuk semua jenis gangguan hubung singkat dengan kondisi sistem yang lebih kompleks, misal dengan sistem distribusi radial ataupun sistem yang terhubung dengan *smart grid* sehingga mampu memecahkan masalah kestabilan sistem tenaga listrik yang kerap terjadi.
2. Dibutuhkan pengujian yang lebih kompleks mengenai metode perhitungan CCT secara langsung dengan harapan hasil dari metode tersebut dapat diterapkan dalam perindustrian atau bahkan sistem kelistrikan di daerah-daerah tertentu guna menjaga kestabilan sistem tenaga listrik pada tempat tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Grigsby, Leonard.L, *Power Sistem Stability and Control*. New York: CRC Press, 2012.
- [2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and Classification of Power Sistem Stability," *IEEE Transaction on Power Sistem*, Vol.19, No.2, May. 2004.
- [3] Atmaja Surya, A.Priyadi, dan T.Yuwono "Perhitungan *Critical Clearing Time* dengan Menggunakan Metode *Time Domain Simulation*". Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [4] Grainger, Jhon. J dan William D. Stevenson, JR, *Power Sistem Analysis*. New York: McGraw-Hill, Inc,
- [5] N. Yorino, A. Priyadi, Y. Zoka. "*A Method for Transient Stability Assessment Based on Critical Trajectory*". Proc. on The International Symposium on Sustainable Energy (ISSE), Tokyo, Japan. 2007
- [6] Priyadi Ardyono, N. Yorino, dan Mauridhi H. P. "*Critical trajectory for Transient Stability Analysis*". Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. 2012
- [7] Yorino, Naoto, Ardyono Priyadi, Hironori Kakui, dan Mitsuhiro Takeshita. *A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*. IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [8] Saadat, Hadi, *Power Sistem Analysis*, New York;McGraw-Hill, Inc, 1999
- [9] Xuefeng Bai, T.Jiang, Z.Guo, Zheng Yan, Y.Ni, *A unifier approach to processing unbalanced conditions in transient stability calculations*". Proc. on Power Engineering Society General Meeting, Hong Kong, China. 2004.
- [10] J. Matsuki, T.Okada, dan C.Uenosono. *Loss of synchronism Process of a synchronous generatordescribed by its internal flux and force distributions*. IEEE Transactions on energy conversions Vol.7, No.1, March 1992.
- [11] Anderson, P.M. dan A.A. Fouad, *Power Sistem Control and Stability*. United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2003.



RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Galuh Santiko Aji, lahir pada tanggal 26 September 1993 di Kota Jepara, Provinsi Jawa Tengah. Penulis merupakan putra ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Slamet Hariyadi, S.H. dan Musdalifah. Memulai jenjang pendidikan di TK ABA II Bangsri pada tahun 1997 hingga tahun 1999, kemudian melanjutkan pendidikan dasar di SDN 05 Bangsri selama 6 tahun, lulus dari sekolah dasar penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP N 1 Bangsri selama tiga tahun, dan kemudian melanjutkan ke SMA N 1 Jepara selama tiga tahun mulai dari tahun 2008 hingga tahun 2011. Lulus dari pendidikan menengah atas, penulis memilih Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan Jurusan Teknik Elektro fokus bidang studi Teknik Sistem Tenaga sebagai pendidikan tingkat lanjutnya pada tahun 2011 hingga 2015. Sejak dari SMP hingga masuk ke Perguruan Tinggi, penulis aktif sebagai anggota sampai pengurus inti organisasi di sekolah dan kampus. Tercatat pada tahun 2013 sebagai pengurus inti dari Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro, selain itu juga aktif sebagai anggota Tim Pemandu LKMM dan asisten Laboratorium Instrumentasi dan Identifikasi Sistem Tenaga sejak 2013 hingga sekarang

Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) pada Kondisi *Unbalanced* Menggunakan Metode Modifikasi *Loss of Synchronization* pada Sistem Multimesin

Galuh Santiko Aji, Ardyono Priyadi, dan Feby Agung Pamuji
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Sukolilo, Surabaya 60111
Email: priyadi@ee.its.ac.id

Abstrak -- Analisis mengenai kestabilan transien sistem tenaga listrik memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin keamanan dan keberlangsungan operasional suatu sistem tenaga listrik. Pada saat terjadi gangguan, sistem akan mengalami beberapa fase kondisi, salah satu kondisi paling vital adalah kondisi transien. Pada kondisi *transient* terjadi gangguan yang lebih besar seperti hubung singkat. Sebagian besar gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik adalah jenis gangguan tidak seimbang. Dalam kondisi tersebut rele pengaman akan bekerja untuk membuka *circuit breakers* (CB). Pada umumnya CB akan bekerja dalam kurun waktu 200-300 ms. Akan tetapi hal ini tidak menjamin sebuah sistem akan langsung kembali pada kondisi *steady state*. Hal ini disebabkan adanya waktu pemutus kritis / *Critical Clearing Time* (CCT) ketika kondisi transien. CCT merupakan perhitungan batas waktu pemutus kritis setelah terjadi gangguan. Apabila gangguan diputus sebelum CCT maka sistem dapat kembali stabil. Namun apabila gangguan diputus lebih dari CCT maka sistem tidak dapat kembali stabil. Oleh karena itu diperlukan perhitungan CCT yang akurat untuk kelangsungan operasi dari sistem tenaga listrik. Dalam tugas akhir ini akan dihitung nilai CCT pada sistem multimesin menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* dengan berbagai kondisi gangguan hubung singkat tidak setimbang.

I. PENDAHULUAN

Dalam sebuah sistem tenaga listrik diperlukan kondisi stabil untuk segala operasi sistem, karena hal tersebut mampu menjamin keamanan dan kontinuitas penyaluran daya dalam sistem tenaga listrik. Kestabilan sistem tenaga adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk kembali ke kondisi operasi yang stabil setelah sistem tersebut mengalami gangguan. Dalam sistem tenaga listrik yang termasuk gangguan besar antara lain, trip pembangkit, hubung singkat dan motor *starting*. Pada umumnya gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik adalah jenis gangguan tidak seimbang yang diantaranya adalah gangguan hubung singkat tidak simetri. Contoh gangguan hubung singkat tidak simetri antara lain adalah gangguan *single line to ground fault*, *line to line faults* atau *double line to ground faults*. Apabila terjadi gangguan tersebut dan tidak segera dihilangkan, akan terjadi perbedaan yang besar antara daya input mekanis dan daya output listrik dari generator, kelebihan atau kekurangan input daya mekanis terhadap sistem dapat menyebabkan terjadinya percepatan atau perlambatan putaran rotor generator yang akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Kehilangan sinkronisasi disini didefinisikan sebagai ketidakseimbangan antara daya pembangkit dan beban menimbulkan suatu keadaan *transient* yang menimbulkan peristiwa ayunan rotor dalam generator. Pada waktu gangguan terjadi, rele pengaman akan bekerja untuk membuka *circuit breakers* dalam waktu kurang dari 200-300 ms. Akan tetapi hal ini tidak menjamin sistem akan kembali dalam kondisi stabil dikarenakan adanya waktu pemutus kritis / *critical clearing*

time (CCT) pada sistem tenaga listrik. CCT adalah perhitungan batas waktu kritis setelah terjadi gangguan dimana saat terjadi gangguan harus diputus sebelum nilai CCT agar sistem dapat kembali stabil. Apabila *circuit breaker* dan gangguan diputus lebih dari CCT maka sistem tidak dapat kembali stabil. Tentunya pada masing-masing karakteristik gangguan hubung singkat memiliki nilai waktu kerja rele pengaman yang berbeda. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis untuk mengetahui nilai waktu kerja rele pengaman yang mempengaruhi hasil dari nilai CCT yang didapatkan pada masing-masing karakteristik gangguan hubung singkat.

Berbeda dengan metode simulasi konvensional, formulasi metode ini berdasarkan pada batas nilai permasalahan agar secara langsung mendapatkan nilai pasti dari CCT. Metode ini berdasarkan pada perhitungan *critical trajectory*, dimana *trajectory* tersebut dimulai pada saat terjadi gangguan hingga mencapai kondisi titik akhir yang disebut *Unstable Equilibrium Point* yang diperoleh melalui kondisi *loss of synchronization*. Sehingga *critical trajectory* dan CCT dapat dihitung secara bersamaan.

II. KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

A. Kestabilan Transien

Kestabilan transien atau kestabilan sudut rotor gangguan besar adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk tetap dalam kondisi sinkron ketika mengalami gangguan besar. Gangguan ini dapat mencakup gangguan hubung singkat, atau kehilangan pembangkit. Respon sistem yang dihasilkan ketika terjadi gangguan transien adalah adanya penyimpangan dari sudut rotor generator karena pengaruh dari ketidaklinearan sudut daya. Pada umumnya respon sudut rotor dalam kondisi stabil akan berosilasi hingga mencapai amplitudo maksimum, kemudian menurun dalam kondisi *steady state*. Dalam kondisi tidak stabil respon sudut rotor dapat dijelaskan melalui dua peristiwa yaitu *first swing instability* ketika sudut rotor meningkat melebihi nilai maksimum karena kurangnya torsi sinkronisasi. Dan yang kedua adalah *multi swing instability* terjadi ketika osilasi sudut rotor terus meningkat melebihi nilai maksimum hingga kehilangan sinkronisasi.

B. Persamaan Ayunan

Pada sebuah operasi sistem tenaga listrik, torsi mekanik dan elektrik dituntut untuk memiliki nilai yang sama agar terjadi keseimbangan dan stabilitas sistem tetap terjaga. Akan tetapi, ketika terjadi gangguan akan terjadi perubahan secara langsung terhadap kedua torsi tersebut yang mengakibatkan keseimbangan kedua torsi tersebut terganggu sehingga menimbulkan percepatan atau perlambatan putaran rotor generator. Secara umum persamaan untuk torsi tersebut adalah sebagai berikut :

$$T_a = T_m - T_e$$

Persamaan ayunan didasarkan pada sebuah prinsip dalam dinamika yang menyatakan bahwa torsi percepatan adalah hasil kali dari momen inersia rotor dan percepatan sudutnya. Ketika sistem mengalami gangguan maka akan terdapat perbedaan nilai sehingga akan terdapat nilai T_a (torsi percepatan) yang mengakibatkan terjadinya perbedaan sudut rotor pada generator. Kita ingat dari hukum dinamika dasar bahwa nilai daya adalah sama dengan momen-putar dikalikan dengan kecepatan sudut.

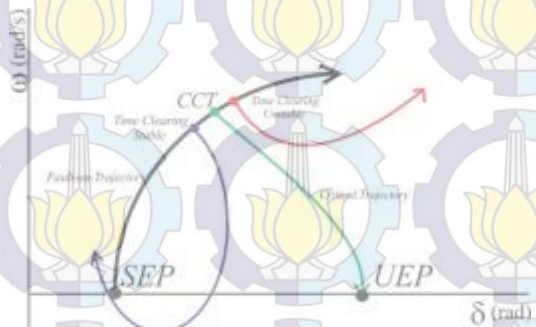
Dalam praktek system tenaga listrik yang dimaksud dengan persamaan ayunan adalah persamaan dasar yang mengatur dinamika/ pergerakan dari putaran sebuah mesin sinkron dalam praktik studi kestabilan sistem tenaga listrik. Dengan definisi persamaan sebagai berikut

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$$

dengan konstanta H yang didefinisikan sebagai energi kinetik dalam satuan watt-second

C. Critical Trajectory

Sebuah lintasan kritis (*critical trajectory*) adalah lintasan yang dimulai dari titik mulai lintasan terjadinya gangguan (*fault on trajectory*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasinya (*loss of synchronization*). Berdasarkan referensi [5]-[6] dijelaskan bahwa untuk Gambar 1 diilustrasikan sebuah lintasan yang terjadi pada kondisi mesin tunggal tanpa kumparan peredam.



Gambar 1. Lintasan Kritis untuk Single Machine tanpa Damping

Terdapat empat jenis lintasan untuk kondisi tersebut. Yang pertama adalah lintasan ketika terjadinya gangguan atau *fault-on-trajectory* yang digambarkan dalam grafik warna hitam dan dimulai dari *Stable Equilibrium Point (SEP)*. Selanjutnya adalah yang merupakan lintasan kondisi stabil dimana gangguan diputus oleh CB kurang dari nilai CCT (*Critical Clearing Time*) dalam sistem dan akan mengalami osilasi mengelilingi nilai SEP (*Stable Equilibrium Point*) yang digambarkan oleh grafik hijau. Selanjutnya adalah lintasan dimana sistem kehilangan sinkronisasinya dimana gangguan diputus oleh CB lebih dari nilai CCT (*Critical Clearing Time*) dalam sistem digambarkan oleh grafik warna merah. Untuk lintasan yang terakhir merupakan lintasan kritis atau *critical trajectory* untuk kondisi stabil yang merupakan perbatasan antara kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem sesuai dengan nilai CCT yang didapat dan kemudian akan mencapai titik kritis yang disebut UEP (*Unstable Equilibrium Point*).

III. PERHITUNGAN CCT MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI *LOSS OF SYNCHRONIZATION*

A. Pemodelan Sistem

Sistem dapat dimodelkan melalui persamaan masing-masing generator yang diwakili oleh dua persamaan diferensial. *Center of Angle (COA)* dari persamaan ayunan digunakan untuk kedua simulasi yaitu *numerical simulation* dan *direct method simulation* dengan penjabaran persamaan sebagai berikut

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\omega_i)$$

Dengan nilai

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$$

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\theta))$$

Dengan menggunakan persamaan dasar perhitungan daya aktif, dapat dihitung daya mekanis dan elektris dari generator. Nilai daya mekanis dan elektris sangat bergantung pada admitansi saluran.

B. Initial Condition

Analisis mengenai kestabilan transien dimulai dengan sistem dalam kondisi stabil dengan titik operasi awal (*intial point*) x_{pre} , ketika terjadi gangguan didefinisikan dengan waktu $t=0$.

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre}$$

Ketika gangguan diputus pada waktu $t = \tau$. Sistem kemudian diatur oleh persamaan non linear yang menunjukkan persamaan dinamis setelah terjadinya gangguan (*post-fault*).

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N$$

Dengan catatan bahwa nilai awal x^0 adalah titik awal pada waktu $t = \tau$ dalam lintasan ketika terjadinya gangguan.

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre})$$

C. Metode Modifikasi Trapezoidal

Pada dasarnya gangguan dalam sebuah sistem tenaga harus diputus pada nilai CCT dan kemudian nilai *state variable* bertemu pada *critical point*. Dalam beberapa kasus tertentu nilai *critical point* memiliki nilai sama dengan nilai UEP dan *fault on trajectory* mencapai nilai UEP dalam batas waktu tak berhingga. Untuk menghindari perhitungan dengan batas waktu tak berhingga, maka dikembangkan metode baru untuk integrasi numeric. Dengan persamaan untuk jarak dua buah titik sebagai berikut

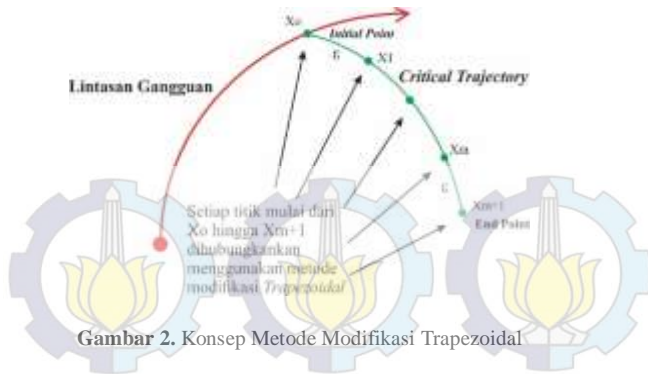
$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k)$$

Melalui persamaan transformasi waktu terhadap jarak sebagai berikut

$$(t^{k+1} - t^k) = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon$$

Dengan proses substitusi didapatkan persamaan sebagai berikut

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon = 0$$



D. Kondisi Kritis Hilangnya Sinkronisasi

Untuk kondisi multi mesin persamaan hilangnya sinkronisasi dituliskan berdasarkan koefisien matriks hilangnya gaya sinkronisasi

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \quad \text{Dengan } |v| \neq 0$$

Dimana $v \in R^{N_{Gen}}$ merupakan eigenvector yang berhubungan dengan nilai matriks zero eigenvalue. Dengan asumsi bahwa kondisi eigenvector harus sesuai dengan arah perubahan dari θ . Dengan nilai $k_s \in R$ maka nilai eigenvector didapatkan melalui persamaan berikut

$$v = k_s \cdot \dot{\theta}$$

Persamaan diatas menunjukkan nilai end point pada metode critical trajectory. Untuk metode modifikasi hilangnya sinkronisasi, dalam penentuan nilai end point sepanjang critical trajectory nilai dan arah eigenvector dari θ terhadap posisi UEP (Unstable Equilibrium Point) tidak dipertimbangkan. Oleh karena itu, nilai end point dalam metode modifikasi hilangnya sinkronisasi hanya dijabarkan dalam persamaan

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta}$$

Dengan \dot{P} merupakan fungsi dari rotor generator

E. Perumusan Minimalisasi

Perumusan masalah dalam kondisi kritis untuk analisis kestabilan transien dalam sistem multi machine didefinisikan sebagai berikut

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \epsilon, \tau, k_s, v} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\}$$

Dengan nilai,

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \epsilon$$

$$\mu^{m+1} = \left[\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot \dot{\theta} \right]$$

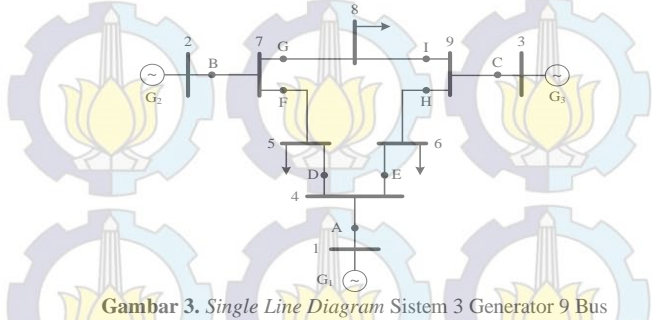
Nilai μ^k akan bernilai nol, berdasarkan persamaan trapezoidal yang akan menghubungkan nilai x^k , mulai dari $k=0$ sampai dengan $m+1$.

Hasil dari persamaan diatas adalah penentuan x^k , mulai dari $k=0$ hingga $m+1$ merepresentasikan critical trajectory yang masing-masing titiknya telah dihubungkan menggunakan metode modifikasi Trapezoidal, dimana ϵ secara otomatis

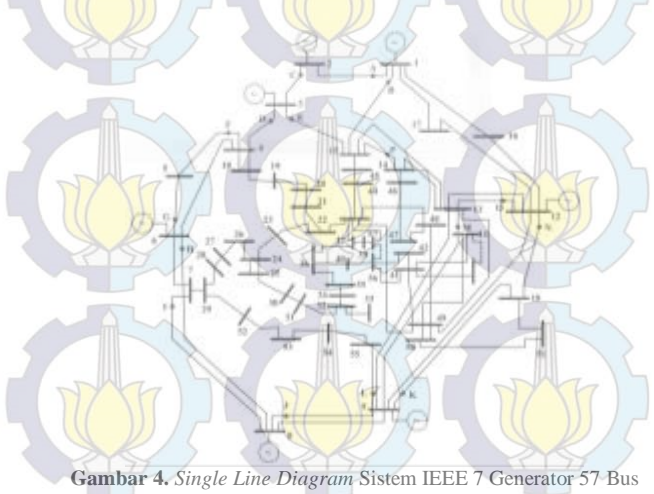
ditentukan ketika jumlah integrasi m telah ditentukan, CCT dan titik akhir masing-masing diperoleh sebagai τ dan x^{m+1}

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

Melalui Single Line Diagram pada Gambar 3, dilakukan simulasi perhitungan CCT dengan mengabaikan nilai damping pada setiap generator. Dengan menggunakan metode critical trajectory. Besar nilai CCT dan epsilon pada setiap kondisi gangguan akan bergantung jumlah titik m . Dimana titik m merupakan titik antara fault-on-trajectory sampai dengan end point yang didapatkan pada saat kondisi loss of synchronization dari generator. Pada simulasi ini diberikan nilai m untuk keseluruhan kondisi gangguan sebesar 10.



Gambar 3. Single Line Diagram Sistem 3 Generator 9 Bus



Gambar 4. Single Line Diagram Sistem IEEE 7 Generator 57-Bus

Melalui Single Line Diagram pada Gambar 3 dan Gambar 4 dilakukan simulasi perhitungan CCT dengan mengabaikan nilai damping pada setiap generator. Dengan menggunakan metode critical trajectory. Besar nilai CCT dan epsilon pada setiap kondisi gangguan akan bergantung jumlah titik m . Pada simulasi ini diberikan nilai m untuk keseluruhan kondisi gangguan sebesar 10. Analisis nilai CCT yang didapatkan melalui perhitungan langsung akan dibandingkan dengan nilai CCT yang didapatkan melalui metode numerical simulation method, jika nilai CCT pada perhitungan langsung memiliki nilai kurang dari batas bawah dari metode numerical simulation method maka akan didapatkan nilai error negative, jika melebihi nilai batas atasnya akan didapatkan nilai error positif. Tabel analisis nilai CCT untuk system 3 gen 9 bus dan 7 gen 57 bus akan diberikan pada Tabel 1. Sampai Tabel 4.

Sedangkan untuk analisis perhitungan CCT yang menggunakan damping pada system, diberikan nilai damping yang sama untuk keseluruhan kondisi gangguan hubung singkat yakni sebesar 5%. Tabel analisis perhitungan CCT menggunakan damping dapat dilihat pada Tabel . hingga Tabel 8.

Untuk analisis grafik respon sudut rotor terhadap gangguan, diberikan hasil plotting grafik berdasarkan simulasi yang telah dijalankan, dengan sampel titik gangguan A untuk system 3 generator 9 bus. Grafik yang dihasilkan berupa grafik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ) dalam kondisi stabil dan tidak stabil. Analisis karakteristik grafik dalam kondisi stabil dimana gangguan yang terjadi diputus sebelum nilai batas bawah atau berada dalam rentang CCT yang didapat melalui metode *numerical simulation method* diwakili oleh kurva berwarna “biru” yang mewakili kondisi stabil jika gangguan diputus sebelum CCT. Sedangkan untuk kurva berwarna “merah” mewakili kondisi sistem tidak stabil karena pemutusan gangguan melebihi nilai batas atas CCT yang didapat dari *numerical simulation method*. Sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan *critical trajectory* hasil dari simulasi sehingga didapatkan nilai CCT secara langsung.

- Gangguan satu fasa ke tanah tanpa *damping*

Tabel 1. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* gangguan satu fasa ke tanah

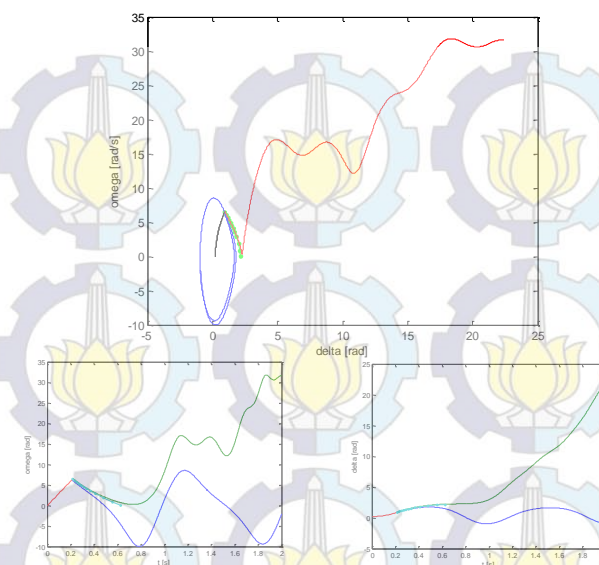
Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2187	0.3415	0.21-0.22	203.41	0
B	2-7	0.1966	1.0257	0.20-0.21	210.26	-1.7
C	3-9	0.2186	1.0821	0.21-0.22	210.82	0
D	4-5	0.2247	0.8890	0.22-0.23	208.89	0
E	4-6	0.2245	0.8954	0.22-0.23	208.95	0
F	5-7	0.2107	0.8619	0.21-0.22	208.62	0
G	7-8	0.2147	0.8705	0.21-0.22	208.71	0
H	9-6	0.2126	0.8721	0.21-0.22	208.72	0
I	9-8	0.2203	0.9910	0.22-0.23	209.91	0
RATA - RATA			0.8699		208.69	

Tabel 2. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* gangguan satu fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0.1012	1.4553	0.10-0.11	214.553	0
B	1-15	0.1023	1.4260	0.10-0.11	214.260	0
C	2-3	0.0971	1.4602	0.09-0.10	214.602	0
D	3-4	0.1010	1.2909	0.10-0.11	212.909	0
E	3-15	0.1000	1.9669	0.10-0.11	219.669	0
F	4-5	0.1008	1.8513	0.10-0.11	218.513	0
G	6-5	0.1008	1.5925	0.10-0.11	215.925	0
H	6-8	0.0963	1.3692	0.09-0.10	213.692	0
I	7-8	0.0966	1.5735	0.09-0.10	215.735	0
J	8-9	0.0939	2.1628	0.09-0.10	221.628	0
K	9-10	0.1000	1.4558	0.10-0.11	214.558	0
L	9-55	0.1000	1.5748	0.10-0.11	215.748	0
M	11-13	0.1009	1.4728	0.10-0.11	214.728	0
N	12-10	0.1002	1.3611	0.10-0.11	213.611	0
O	12-13	0.1002	1.4334	0.10-0.11	214.334	0
P	14-15	0.1001	1.4844	0.10-0.11	214.844	0
RATA - RATA			1.5581		215.581	

Dari keseluruhan hasil simulasi untuk system 3 gen 9 bus, didapatkan nilai *error* sebesar 0% kecuali pada titik gangguan B. Pada titik gangguan B terdapat *error* sebesar -1,7% karena untuk titik gangguan B melalui simulasi konvensional didapatkan batas CCT Antara 0,20(s)-0,21(s) sedangkan

melalui perhitungan langsung didapatkan nilai CCT 0,1966 (s), sedangkan untuk system 7 gen 57 bus tidak terdapat *error* untuk keseluruhan titik gangguan.



Gambar 5. Grafik Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah tanpa *Damping*

- Gangguan dua fasa ke tanah tanpa *damping*

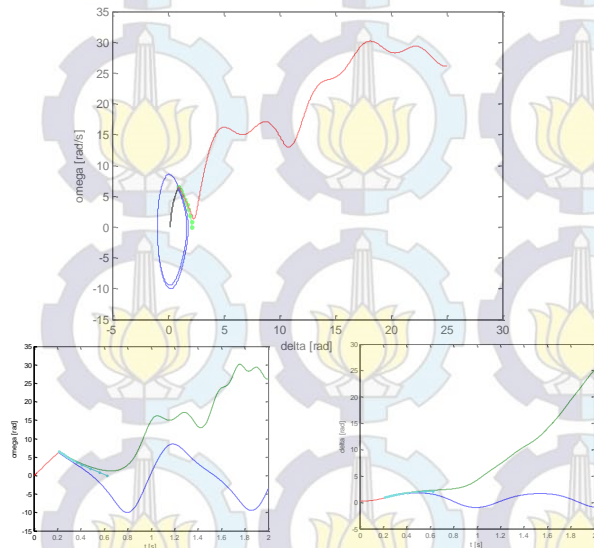
Tabel 3. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* gangguan dua fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2177	0.8584	0.21-0.22	203.41	0
B	2-7	0.1967	1.4952	0.20-0.21	210.26	-1.6
C	3-9	0.2184	0.8703	0.21-0.22	210.82	0
D	4-5	0.2244	0.9951	0.22-0.23	208.89	0
E	4-6	0.2244	0.8740	0.22-0.23	208.95	0
F	5-7	0.2094	0.8687	0.20-0.21	208.62	0
G	7-8	0.2146	0.8848	0.21-0.22	208.71	0
H	9-6	0.2123	0.9424	0.21-0.22	208.72	0
I	9-8	0.2162	0.9601	0.22-0.23	209.91	0
RATA - RATA			0.9610		209.61	

Tabel 4. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* gangguan dua fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0.1013	1.3919	0.10-0.11	213.919	0
B	1-15	0.1023	1.2171	0.10-0.11	212.171	0
C	2-3	0.0968	0.4222	0.09-0.10	204.222	0
D	3-4	0.1010	0.3637	0.10-0.11	203.637	0
E	3-15	0.1000	0.4699	0.10-0.11	204.699	0
F	4-5	0.1009	0.5143	0.10-0.11	205.143	0
G	6-5	0.1008	0.4490	0.10-0.11	204.49	0
H	6-8	0.0965	0.4207	0.09-0.10	204.207	0
I	7-8	0.0964	0.4896	0.09-0.10	204.896	0
J	8-9	0.0944	0.6314	0.09-0.10	206.314	0
K	9-10	0.1001	0.4209	0.10-0.11	204.209	0
L	9-55	0.1004	0.4026	0.10-0.11	204.026	0
M	11-13	0.1001	0.4298	0.10-0.11	204.298	0
N	12-10	0.1002	0.3842	0.10-0.11	203.842	0
O	12-13	0.1000	0.4008	0.10-0.11	204.008	0
P	14-15	0.1001	0.4197	0.10-0.11	204.197	0
RATA - RATA			0.5517		205.517	

Dari keseluruhan hasil simulasi untuk system 3 gen 9 bus, didapatkan nilai *error* sebesar 0% kecuali pada titik gangguan B. Pada titik gangguan B terdapat *error* sebesar -1,6% karena untuk titik gangguan B melalui simulasi konvensional didapatkan batas CCT Antara 0,20(s)-0,21(s) sedangkan melalui perhitungan langsung didapatkan nilai CCT 0,1966 (s), sedangkan untuk system 7 gen 57 bus tidak terdapat *error* untuk keseluruhan titik gangguan.



Gambar 6. Grafik Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah tanpa *Damping*

- Gangguan antar fasa dengan *damping*

Tabel 5. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan numerical simulation method untuk sistem 3 generator 9 bus dengan damping gangguan antar fasa.

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2542	0.2904	0.25-0.26	208.51	0
B	2-7	0.2425	1.1668	0.21-0.22	211.66	0
C	3-9	0.2544	0.2743	0.25-0.26	210.10	0
D	4-5	0.2611	0.3102	0.26-0.27	209.37	0
E	4-6	0.2604	0.3262	0.26-0.27	208.92	0
F	5-7	0.2438	0.3522	0.24-0.25	208.62	0
G	7-8	0.2540	0.4203	0.25-0.26	208.76	0
H	9-6	0.2478	0.2880	0.24-0.25	207.37	0
I	9-8	0.2574	0.2827	0.25-0.26	209.01	0
RATA-RATA			0.9149		209.15	

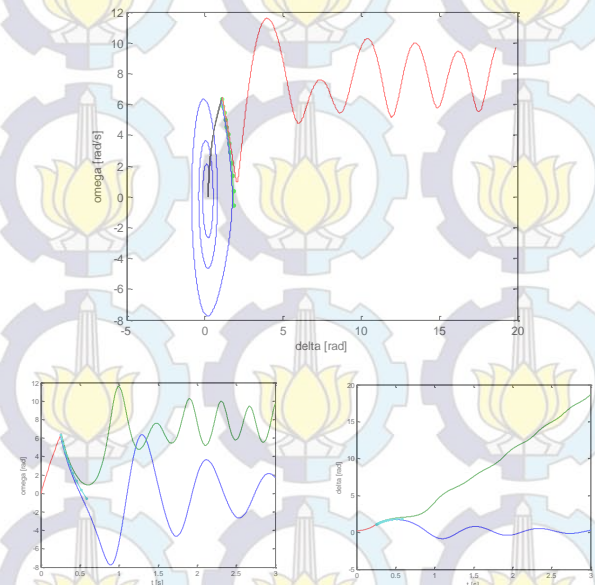
Tabel 6. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan numerical simulation method untuk sistem 7 generator 57 bus dengan damping gangguan antar fasa

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1138	0,4204	0,11-0,12	204,204	0
B	1-15	0,1129	0,4351	0,11-0,12	204,351	0
C	2-3	0,1074	0,4514	0,10-0,11	204,514	0
D	3-4	0,1107	0,4817	0,11-0,12	204,817	0
E	3-15	0,1109	0,6137	0,11-0,12	206,137	0
F	4-5	0,1109	0,5489	0,11-0,12	205,489	0
G	6-5	0,1114	0,5063	0,11-0,12	205,063	0
H	6-8	0,1102	0,5175	0,11-0,12	205,175	0
I	7-8	0,1103	0,5369	0,11-0,12	205,369	0
J	8-9	0,1064	0,5094	0,10-0,11	205,094	0

Lanjutan Tabel 5. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan numerical simulation method untuk sistem 3 generator 9 bus dengan damping gangguan antar fasa

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
K	9-10	0,1117	0,4528	0,11-0,12	204,528	0
L	9-55	0,1102	0,4535	0,11-0,12	204,535	0
M	11-13	0,1107	0,4154	0,11-0,12	204,154	0
N	12-10	0,1107	0,3984	0,11-0,12	203,984	0
O	12-13	0,1112	0,425	0,11-0,12	204,25	0
P	14-15	0,1103	0,4243	0,11-0,12	204,243	0
RATA-RATA			0,4744		204,744	

Untuk keseluruhan perhitungan CCT pada system 3 generator 9 bus dan 7 generator 57 bus, didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa keseluruhan nilai CCT pada perhitungan langsung telah berada dalam *range* nilai CCT pada metode *numerical simulation method*.



Gambar 7. Grafik Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa dengan *Damping*

- Gangguan tiga fasa ke tanah dengan *damping*

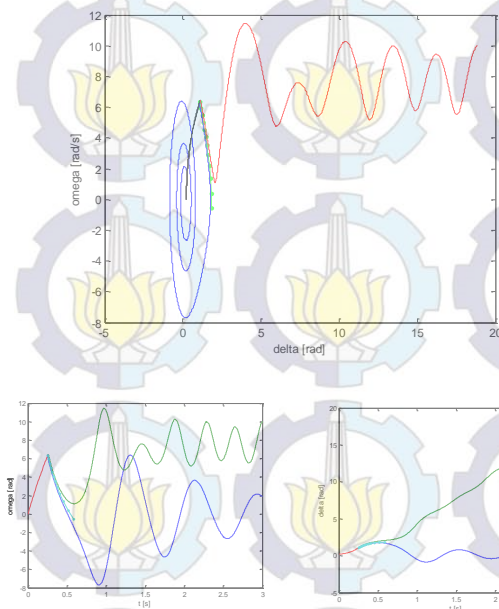
Tabel 7. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan numerical simulation method untuk sistem 3 generator 9 bus dengan damping gangguan tiga fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2535	0.2919	0.25-0.26	208.51	0
B	2-7	0.2428	1.1668	0.24-0.25	211.66	0
C	3-9	0.2581	0.2878	0.25-0.26	210.10	0
D	4-5	0.2610	0.3155	0.26-0.27	209.37	0
E	4-6	0.2605	0.2963	0.26-0.27	208.92	0
F	5-7	0.2439	0.2712	0.24-0.25	208.62	0
G	7-8	0.2542	0.3419	0.25-0.26	208.76	0
H	9-6	0.2479	0.2819	0.24-0.25	207.37	0
I	9-8	0.2575	0.2826	0.25-0.26	209.01	0
RATA-RATA			0.9149		209.15	

Tabel 8. Perbandingan nilai CCT berdasarkan metode perhitungan langsung dengan *numerical simulation method* untuk system 7 generator 57 bus dengan *damping* gangguan tiga fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1139	0,3877	0,11-0,12	203,877	0
B	1-15	0,1146	0,419	0,11-0,12	204,19	0
C	2-3	0,1076	0,4565	0,10-0,11	204,565	0
D	3-4	0,1117	0,5133	0,11-0,12	205,133	0
E	3-15	0,1120	0,5983	0,11-0,12	205,983	0
F	4-5	0,1109	0,5721	0,11-0,12	205,721	0
G	6-5	0,1115	0,5072	0,11-0,12	205,072	0
H	6-8	0,1104	0,5054	0,11-0,12	205,054	0
I	7-8	0,1103	0,5179	0,11-0,12	205,179	0
J	8-9	0,1064	0,5213	0,10-0,11	205,213	0
K	9-10	0,1117	0,4606	0,11-0,12	204,606	0
L	9-55	0,1104	0,4730	0,11-0,12	204,73	0
M	11-13	0,1115	0,4628	0,11-0,12	204,628	0
N	12-10	0,1105	0,4375	0,11-0,12	204,375	0
O	12-13	0,1106	0,4495	0,11-0,12	204,495	0
P	14-15	0,1110	0,4561	0,11-0,12	204,561	0
RATA - RATA			0,4836		204,836	

Untuk keseluruhan perhitungan CCT pada system 3 generator 9 bus dan 7 generator 57 bus, didapatkan nilai *error* sebesar 0% untuk keseluruhan titik gangguan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa keseluruhan nilai CCT pada perhitungan langsung telah berada dalam *range* nilai CCT pada metode *numerical simulation method*.



Gambar 8. Grafik Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah dengan *Damping*

V. KESIMPULAN

Metode perhitungan langsung berdasarkan *critical trajectory* telah mampu memberikan hasil nilai CCT secara langsung untuk semua jenis gangguan hubung singkat. Hasil yang didapatkan pada bab sebelumnya telah mampu memberikan batasan kapan gangguan dalam sistem seharusnya diselesaikan. Melalui metode *numerical*

simulation method didapatkan *range* pemutusan stabil dan pemutusan tidak stabil. Sedangkan untuk metode perhitungan langsung didapatkan nilai pasti yang pada umumnya berada diantara *range* waktu pemutusan gangguan. Dari segi waktu simulasi antara metode perhitungan langsung dan metode *numerical simulation method*. Dapat disimpulkan bahwa waktu simulasi untuk metode perhitungan langsung lebih cepat jika dibandingkan dengan metode *numerical simulation method*. Dengan menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* telah mendapatkan hasil yang akurat dengan nilai *error* yang didapatkan untuk keseluruhan simulasi kurang dari 2%.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Grigsby, Leonard.L, *Power System Stability and Control*. New York: CRC Press, 2012.
- [2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and Classification of Power System Stability," *IEEE Transaction on Power System*, Vol.19, No.2, May, 2004.
- [3] Atmaja Surya, A.Priyadi, dan T.Yuwono "Perhitungan *Critical Clearing Time* dengan Menggunakan Metode *Time Domain Simulation*". Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [4] Grainger, Jhon. J dan William D. Stevenson, JR, *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, Inc,
- [5] N. Yorino, A. Priyadi, Y. Zoka. "A Method for Transient Stability Assessment Based on Critical Trajectory". Proc. on The International Symposium on Sustainable Energy (ISSE), Tokyo, Japan. 2007
- [6] Priyadi Ardyono, N. Yorino, dan Mauridhi H. P. "Critical trajectory for Transient Stability Analysis". Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. 2012
- [7] Yorino, Naoto, Ardyono Priyadi, Hironori Kakui, dan Mitsuhiro Takeshita. *A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*. IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [8] Saadat, Hadi, *Power System Analysis*, New York; McGraw-Hill, Inc, 1999
- [9] Xuefeng Bai, T.Jiang, Z.Guo, Zheng Yan, Y.Ni, *A unified approach to processing unbalanced conditions in transient stability calculations*". Proc. on Power Engineering Society General Meeting, Hong Kong, China. 2004.
- [10] J. Matsuki, T.Okada, dan C.Uenosono. *Loss of synchronism Process of a synchronous generator described by its internal flux and force distributions*. IEEE Transactions on energy conversions Vol.7, No.1, March 1992.
- [11] Anderson, P.M. dan A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*. United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2003.

VII. RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Galuh Santiko Aji, lahir pada tanggal 26 September 1993 di Kota Jepara, Provinsi Jawa Tengah. Penulis merupakan putra ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Slamet Hariyadi, S.H. dan Musdalifah. Memulai jenjang pendidikan di TK ABA II Bangsri pada tahun 1997 hingga tahun 1999, kemudian melanjutkan pendidikan dasar di SDN 05 Bangsri selama 6 tahun, lulus dari sekolah dasar penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP N 1 Bangsri selama tiga tahun, dan kemudian melanjutkan ke SMA N 1 Jepara selama tiga tahun mulai dari tahun 2008 hingga tahun 2011. Lulus dari pendidikan menengah atas, penulis memilih Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan Jurusan Teknik Elektro fokus bidang studi Teknik Sistem Tenaga sebagai pendidikan tingkat lanjutnya pada tahun 2011 hingga 2015.



Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) Pada Kondisi *Unbalanced* Menggunakan Metode Modifikasi *Loss of Synchronization* Pada Sistem Multimesin

Disampaikan Oleh :

Galuh Santiko Aji

NRP. 2211100125

Dosen Pembimbing :

- 1. Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.**
- 2. Feby Agung Pamuji, S.T., M.T**



Latar Belakang

Kestabilan Sistem Tenaga Listrik sangat diperlukan untuk kontinuitas operasional dan penyaluran daya

Gangguan hubung singkat *unbalanced* menimbulkan ketidakstabilan dalam sistem

Pemutusan gangguan yang dilakukan oleh CB belum menjamin kembalinya kondisi stabil

Dalam mengembalikan sistem dalam kondisi stabil perlu diperhatikan CCT

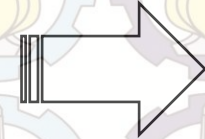


Tujuan PENELITIAN

**Menentukan Nilai
CCT dalam
berbagai kondisi
gangguan hubung
singkat**



**Mampu menjadi
referensi kerja bagi
CB untuk
pemutusan
Gangguan hubung
singkat.**



**Hasil penelitian
dapat menjadi
referensi dalam
perhitungan CCT
dalam berbagai
kondisi gangguan
hubung singkat**



Perumusan Masalah

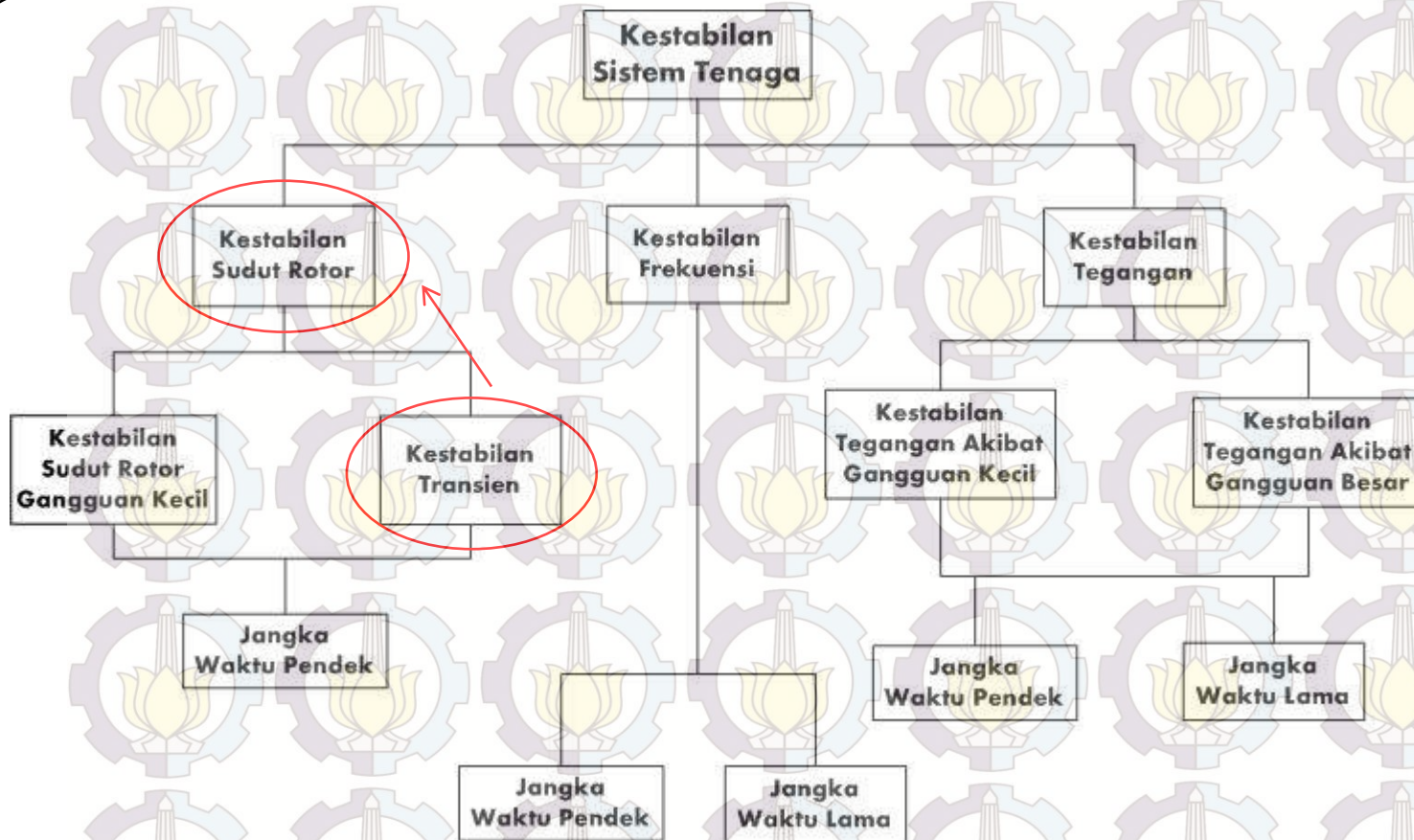
Perhitungan CCT untuk jenis gangguan :

1. **Hubung singkat satu fasa ke tanah**
2. **Hubung Singkat antar fasa**
3. **Hubung singkat dua fasa ke tanah**
4. **Hubung singkat tiga fasa ke tanah**

Sistem 3 generator 9 Bus dan 7 Generator 57 Bus tanpa *damping* dan menggunakan *damping*



Teori Penunjang



Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

“IEEE Transactions on Power System”



TEORI PENUNJANG

- **Kestabilan Transient**

Stable Condition

Kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali dalam kondisi operasi stabil setelah terjadi gangguan

**Unstable Condition
After Clearing
Faults**

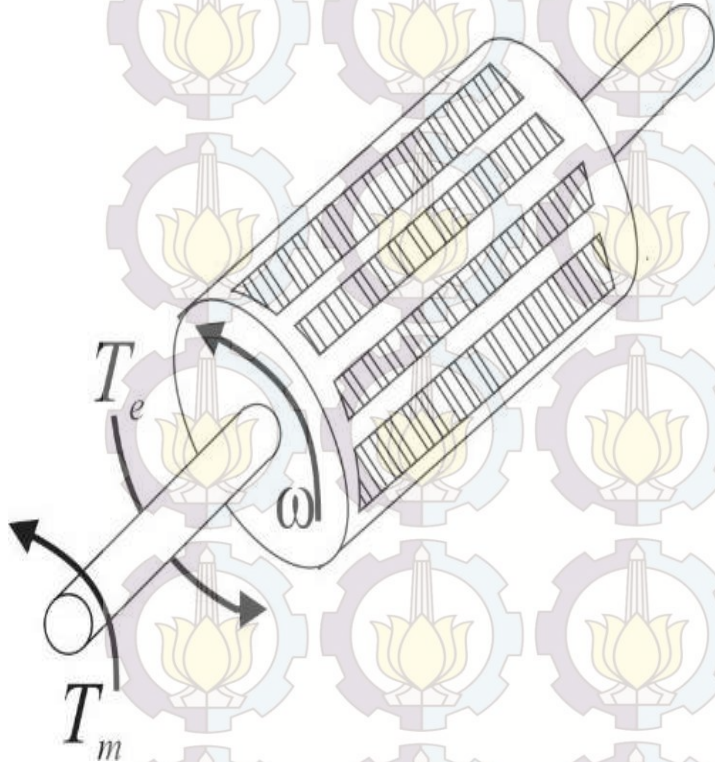
Respon sistem yang dihasilkan berupa penyimpangan sudut rotor akibat adanya perubahan daya mekanis dan listrik

**Stable Condition
After Clearing
Faults**



Teori Penunjang

• Persamaan Ayunan



torsi mekanik dan elektrik dituntut untuk memiliki nilai yang sama agar terjadi keseimbangan dan kestabilan dalam sistem

$$T_a = T_m - T_e$$

Bernilai "0" ketika operasi normal

Saat terjadi gangguan menyebabkan terjadinya perbedaan antara daya mekanis dan listrik sehingga menimbulkan perlambatan atau bahkan percepatan rotor

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e$$

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$$

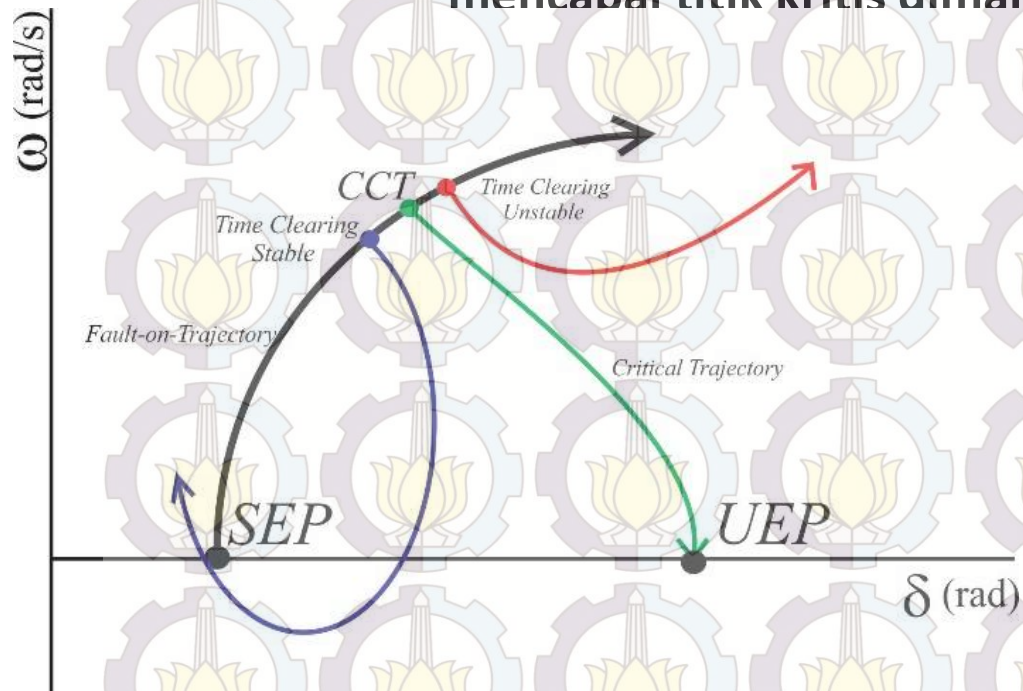
Persamaan Ayunan Generator Sinkron



Teori Penunjang

• *Critical Trajectory*

Lintasan yang dimulai dari titik mulai lintasan terjadinya gangguan (*fault on trajectory*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasinya



Kurva "Hitam" *Fault-on-Trajectory*

Kurva "Biru" Lintasan Stabil

Kurva "Merah" Lintasan Tidak Stabil

Kurva "Hijau" *Critical Trajectory*

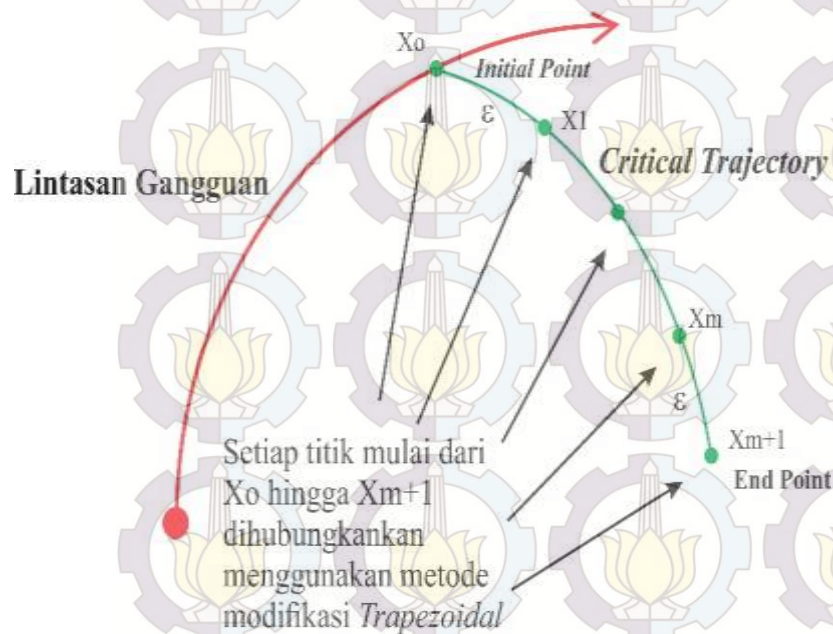


Pemodelan Sistem

• Metode Modifikasi Trapezoidal

Persamaan Umum Trapezoidal

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2} (\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k) (t^{k+1} - t^k) \longrightarrow \dot{x}^k = f(x^k)$$



$$\epsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k)$$

Jarak dua buah titik

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \epsilon = 0$$

MODIFIKASI
TRAPEZOIDAL



PEMODELAN SISTEM

- **Modifikasi Loss of Synchronization**

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v$$

$$v = k_s \cdot \dot{\theta}$$

Persamaan Umum Loss of Synchronization

Mengabaikan nilai eigenvalue dan eigenvector

Persamaan Modifikasi Loss of Synchronization

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta}$$



PEMODELAN SISTEM

• Perhitungan CCT

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, ks, v} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\}$$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon$$

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Identity Matrices

Initial Point

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre})$$

End Point

$$\mu^{m+1} = \begin{bmatrix} \partial P^{m+1} \\ \partial \theta^{m+1} \cdot \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

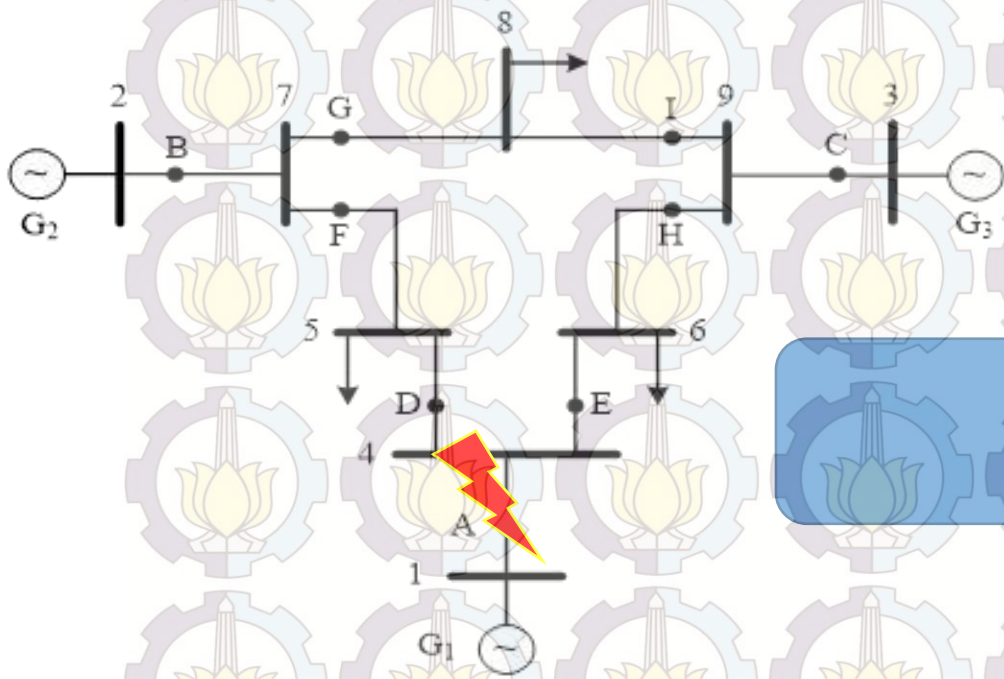
Modifikasi Loss of synchronization



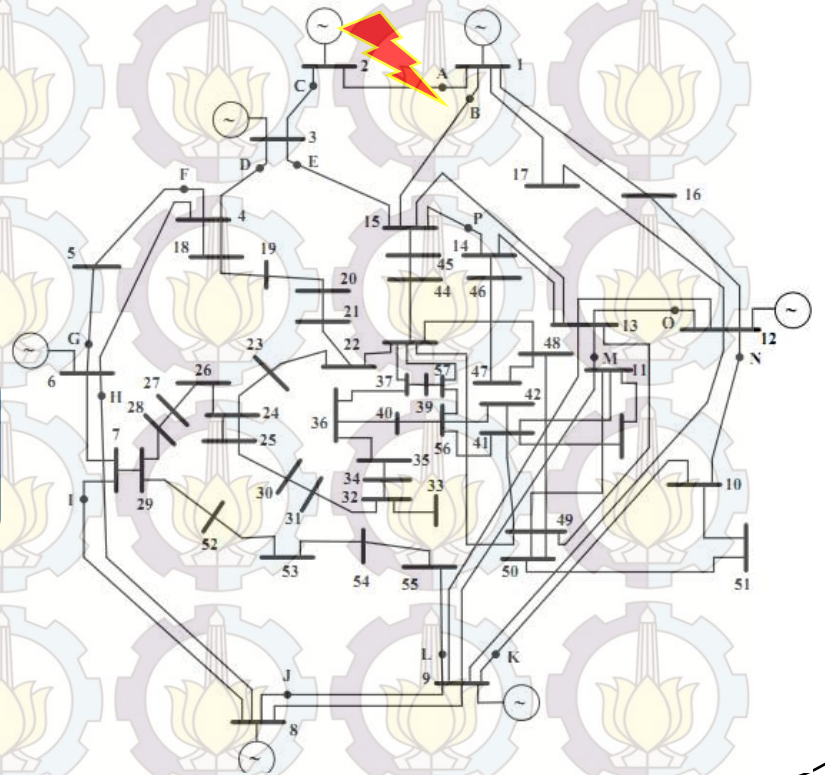
Simulasi dan Analisis

Sistem Anderson dan Fouad 3 Generator 9 Bus

Sistem IEEE 7 Generator 57 Bus



DAMPING 5%





Simulasi Sistem Anderson dan Fouad 3 Generator 9 Bus

• Gangguan Satu Fasa ke Tanah (tanna *dampnina*)

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2187	0.3415	0.21-0.22	203.41	0
B	2-7	0.1966	1.0257	0.20-0.21	210.26	-1.7
C	3-9	0.2186	1.0821	0.21-0.22	210.82	0
D	4-5	0.2247	0.8890	0.22-0.23	208.89	0
E	4-6	0.2245	0.8954	0.22-0.23	208.95	0
F	5-7	0.2107	0.8619	0.21-0.22	208.62	0
G	7-8	0.2147	0.8705	0.21-0.22	208.71	0
H	9-6	0.2126	0.8721	0.21-0.22	208.72	0
I	9-8	0.2203	0.9910	0.22-0.23	209.91	0
RATA - RATA		0.8699		208.69		

CCT Min : 0.1966 (s)
CCT Max : 0.2247 (s)

• Gangguan Satu Fasa ke Tanah (*damping*)

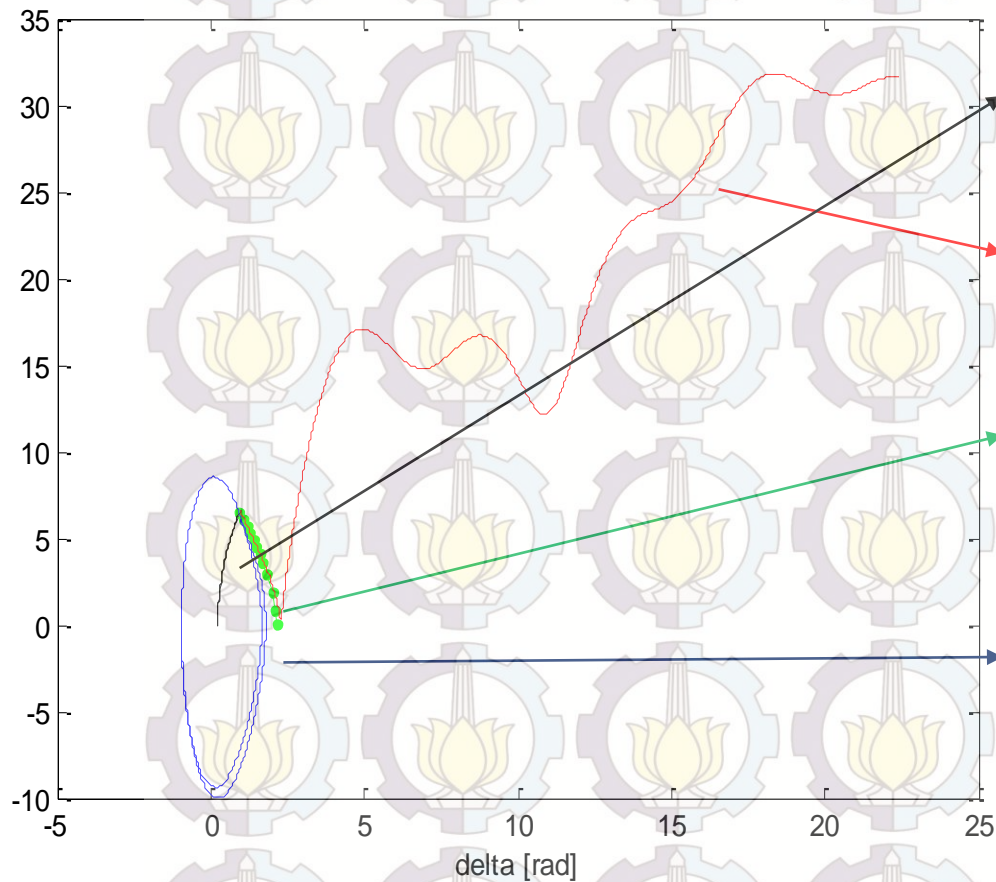
Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2543	0.2646	0.25-0.26	208.51	0
B	2-7	0.2421	1.1668	0.21-0.22	211.66	0
C	3-9	0.2542	0.727	0.25-0.26	210.10	0
D	4-5	0.2611	0.3126	0.26-0.27	209.37	0
E	4-6	0.2604	0.3985	0.26-0.27	208.92	0
F	5-7	0.2438	0.2460	0.24-0.25	208.62	0
G	7-8	0.2540	0.3473	0.25-0.26	208.76	0
H	9-6	0.2478	0.2852	0.24-0.25	207.37	0
I	9-8	0.2574	0.2808	0.25-0.26	209.01	0
RATA - RATA		0.9149		209.15		

CCT Min : 0.2421 (s)
CCT Max : 0.2611 (s)



SIMULASI SISTEM ANDERSON DAN FOUAD

3 GENERATOR 9 BUS

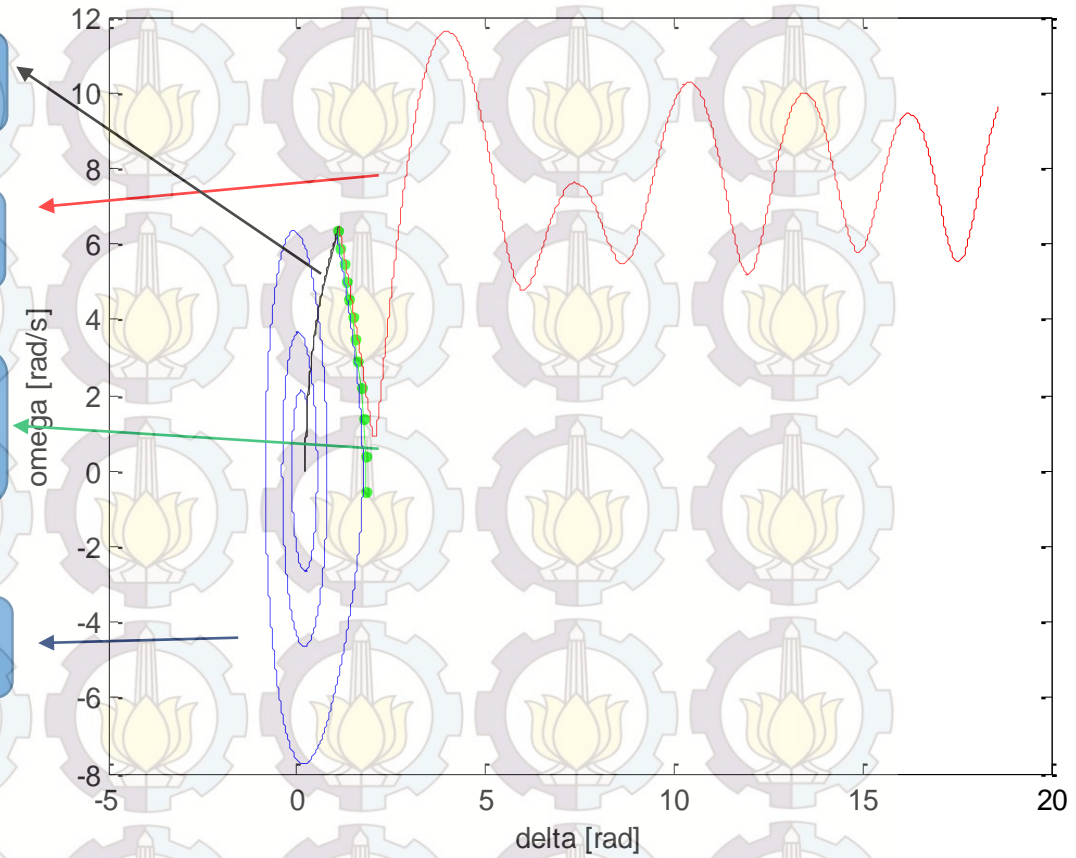


Fault On

Tidak Stabil

Critical Trajectory

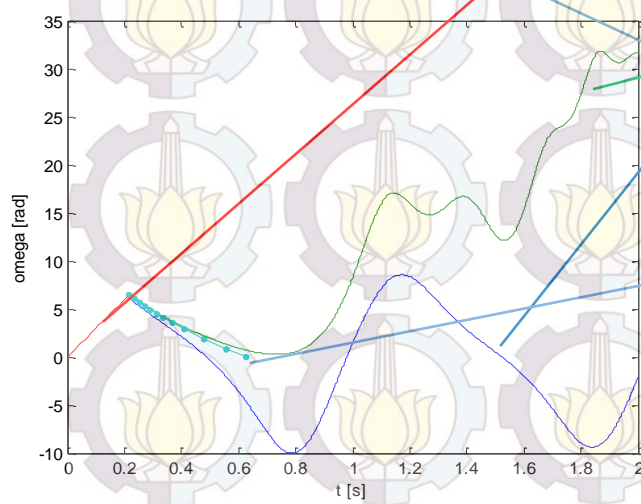
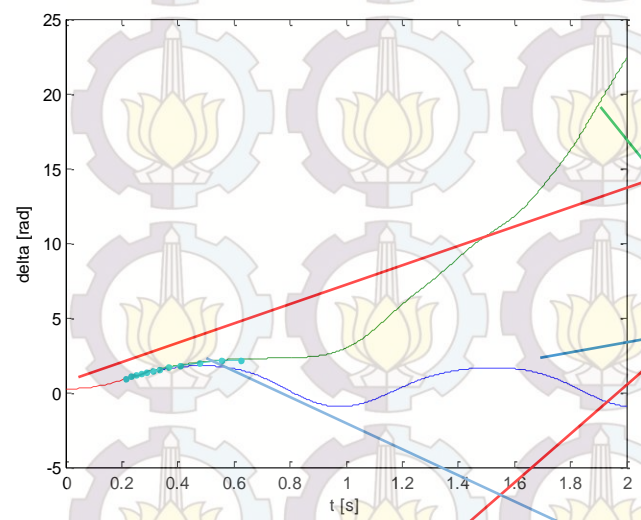
Stabil





SIMULASI SISTEM ANDERSON DAN FOUAD

3 GENERATOR 9 BUS

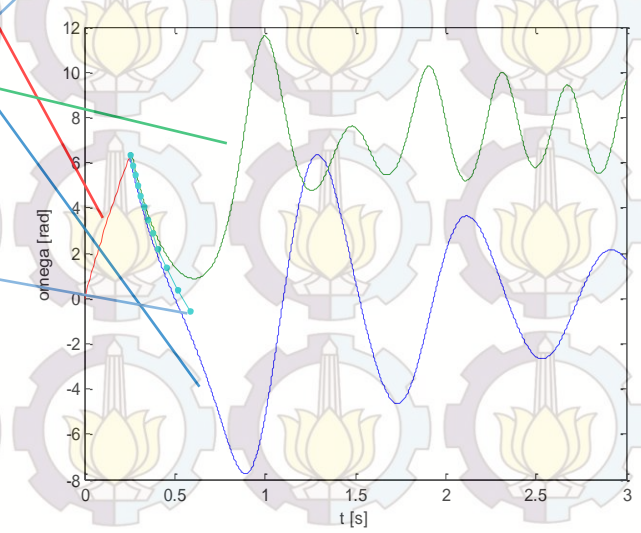
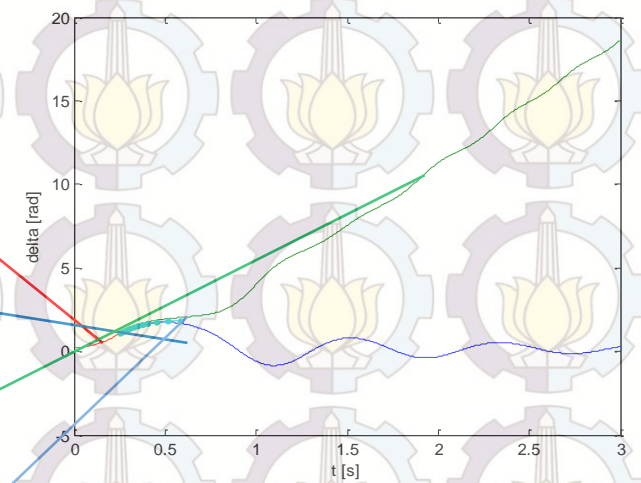


Fault On

Stabil

Tidak Stabil

Critical Trajectory





Simulasi Sistem Anderson dan Fouad 3 Generator 9 Bus

- Gangguan Dua Fasa ke Tanah
(tanpa *damping*)

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2177	0.8584	0.21-0.22	203.41	0
B	2-7	0.1967	1.4952	0.20-0.21	210.26	-1.6
C	3-9	0.2184	0.8703	0.21-0.22	210.82	0
D	4-5	0.2244	0.9951	0.22-0.23	208.89	0
E	4-6	0.2244	0.8740	0.22-0.23	208.95	0
F	5-7	0.2094	0.8687	0.20-0.21	208.62	0
G	7-8	0.2146	0.8848	0.21-0.22	208.71	0
H	9-6	0.2123	0.9424	0.21-0.22	208.72	0
I	9-8	0.2162	0.9601	0.22-0.23	209.91	0
RATA - RATA			0.9610		209.61	

CCT Min : 0.1967 (s)
CCT Max : 0.2244 (s)

- Gangguan Dua Fasa ke Tanah
(*damping*)

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0.2533	0.2692	0.25-0.26	208.51	0
B	2-7	0.2422	1.1668	0.24-0.25	211.66	0
C	3-9	0.2537	0.2674	0.25-0.26	210.10	0
D	4-5	0.2608	0.3155	0.26-0.27	209.37	0
E	4-6	0.2603	0.3348	0.26-0.27	208.92	0
F	5-7	0.2436	0.3488	0.24-0.25	208.62	0
G	7-8	0.2539	0.3493	0.25-0.26	208.76	0
H	9-6	0.2474	0.2808	0.24-0.25	207.37	0
I	9-8	0.2571	0.2813	0.25-0.26	209.01	0
RATA - RATA			0.9149		209.15	

CCT Min : 0.2422 (s)
CCT Max : 0.2608 (s)



Simulasi Sistem IEEE 7 Generator 9 Bus

- Gangguan Antar Fasa
(*tanna dampning*)

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1011	0,4019	0,10-0,11	204,019	0
B	1-15	0,1023	0,3847	0,10-0,11	203,847	0
C	2-3	0,0961	0,4208	0,09-0,10	204,208	0
D	3-4	0,1010	0,3671	0,10-0,11	203,671	0
E	3-15	0,1000	0,4696	0,10-0,11	204,696	0
F	4-5	0,1008	0,5055	0,10-0,11	205,055	0
G	6-5	0,1008	0,4588	0,10-0,11	204,588	0
H	6-8	0,0963	0,4281	0,09-0,10	204,281	0
I	7-8	0,0966	0,4933	0,09-0,10	204,933	0
J	8-9	0,0939	0,4840	0,09-0,10	204,84	0
K	9-10	0,1000	0,4289	0,10-0,11	204,289	0
L	9-55	0,1000	0,4037	0,10-0,11	204,037	0
M	11-13	0,1009	0,5154	0,10-0,11	205,154	0
N	12-10					0
O	12-13					0
P	14-15					0
RATA - R		CCT Min : 0.0939 (s) CCT Max : 0.1023 (s)				53

- Gangguan Antar Fasa
(*damping*)

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1138	0,4204	0,11-0,12	204,204	0
B	1-15	0,1129	0,4351	0,11-0,12	204,351	0
C	2-3	0,1074	0,4514	0,10-0,11	204,514	0
D	3-4	0,1107	0,4817	0,11-0,12	204,817	0
E	3-15	0,1109	0,6137	0,11-0,12	206,137	0
F	4-5	0,1109	0,5489	0,11-0,12	205,489	0
G	6-5	0,1114	0,5063	0,11-0,12	205,063	0
H	6-8	0,1102	0,5175	0,11-0,12	205,175	0
I	7-8	0,1103	0,5369	0,11-0,12	205,369	0
J	8-9	0,1064	0,5094	0,10-0,11	205,094	0
K	9-10	0,1117	0,4528	0,11-0,12	204,528	0
L	9-55	0,1102	0,4535	0,11-0,12	204,535	0
M	11-13	0,1107	0,4154	0,11-0,12	204,154	0
N					203,984	0
O					204,25	0
P					204,243	0
RATA - R		CCT Min : 0.1064 (s) CCT Max : 0.1117 (s)				744



Simulasi Sistem IEEE 7 Generator 9 Bus

- Gangguan Tiga Fasa ke Tanah
(tanpa *damping*)

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1013	0,4198	0,10-0,11	204,198	0
B	1-15	0,1023	0,5355	0,10-0,11	205,355	0
C	2-3	0,0969	0,4226	0,09-0,10	204,226	0
D	3-4	0,1010	0,3668	0,10-0,11	203,668	0
E	3-15	0,0989	0,466	0,10-0,11	204,66	0
F	4-5	0,1009	0,519	0,10-0,11	205,19	0
G	6-5	0,1009	0,4531	0,10-0,11	204,531	0
H	6-8	0,0965	0,4161	0,09-0,10	204,161	0
I	7-8	0,0969	0,4859	0,09-0,10	204,859	0
J	8-9	0,0944	0,626	0,09-0,10	206,26	0
K	9-10	0,1001	0,4179	0,10-0,11	204,179	0
L	9-55	0,1004	0,4042	0,10-0,11	204,042	0
M	11-13	0,1010	0,3806	0,10-0,11	203,806	0
N	12-10				209	0
O	12-13				204	0
P	14-15				173	0
RATA - I					471	

CCT Min : 0.0944 (s)

CCT Max : 0.1023 (s)

- Gangguan Tiga Fasa ke Tanah
(*damping*)

Fault Point	Open Line	Metode Yang Diusulkan		Numerical Simulation Method		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1139	0,3877	0,11-0,12	203,877	0
B	1-15	0,1146	0,419	0,11-0,12	204,19	0
C	2-3	0,1076	0,4565	0,10-0,11	204,565	0
D	3-4	0,1117	0,5133	0,11-0,12	205,133	0
E	3-15	0,1120	0,5983	0,11-0,12	205,983	0
F	4-5	0,1109	0,5721	0,11-0,12	205,721	0
G	6-5	0,1115	0,5072	0,11-0,12	205,072	0
H	6-8	0,1104	0,5054	0,11-0,12	205,054	0
I	7-8	0,1103	0,5179	0,11-0,12	205,179	0
J	8-9	0,1064	0,5213	0,10-0,11	205,213	0
K	9-10	0,1117	0,4606	0,11-0,12	204,606	0
L	9-55	0,1104	0,4730	0,11-0,12	204,73	0
M	11-13	0,1115	0,4628	0,11-0,12	204,628	0
N	12-10				204,375	0
O	12-13				204,495	0
P	14-15				204,561	0
RATA - I					204,836	

CCT Min : 0.1064 (s)

CCT Max : 0.1117 (s)



Kesimpulan

Metode perhitungan langsung berdasarkan *critical trajectory* telah mampu memberikan hasil nilai CCT secara langsung untuk semua jenis gangguan hubung singkat, mulai dari jenis gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, antar fasa dan gangguan tiga fasa ke tanah.

Hasil yang didapatkan pada bab sebelumnya telah mampu memberikan batasan kapan gangguan dalam sistem seharusnya diselesaikan

Nilai perhitungan CCT tiap gangguan untuk semua titik gangguan dapat dijadikan sebagai waktu referensi pemutusan gangguan oleh CB (*Circuit Breakers*) dengan mengambil nilai paling minimum pada setiap titik gangguan



Kesimpulan

Dari segi waktu simulasi antara metode perhitungan langsung dan metode *numerical simulation method*. Dapat disimpulkan bahwa waktu simulasi untuk metode perhitungan langsung lebih cepat jika dibandingkan dengan metode *numerical simulation method*

Dengan menggunakan metode modifikasi *loss of synchronization* telah mendapatkan hasil yang akurat dengan nilai *error* yang didapatkan untuk keseluruhan simulasi kurang dari 2%



Saran Penelitian Selanjutnya

Dalam upaya pengembangan penelitian mengenai metode perhitungan CCT secara langsung perlu dikembangkan perhitungan CCT untuk semua jenis gangguan hubung singkat dengan kondisi sistem yang lebih kompleks

Dibutuhkan pengujian yang lebih kompleks mengenai metode perhitungan CCT secara langsung dengan harapan hasil dari metode tersebut dapat diterapkan dalam perindustrian atau bahkan sistem kelistrikan di daerah-daerah tertentu



TERIMA KASIH